

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

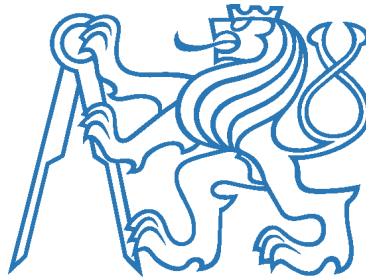


Disertační práce

duben 2018

Ing. Petr Gric, MBA

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Katedra Elektrických pohonů a trakce



Buzení synchronního motoru jako komplexní mechatronický systém

Disertační práce

Ing. Petr Gric, MBA

Praha, duben 2018

Doktorský studijní program: Elektrotechnika a informatika (P 2612)
Studijní obor: Elektrické stroje, přístroje a pohony (2642V004)

Školitel: *prof. Ing. Jiří Pavelka, DrSc.*

Prohlášení autora

Já, Ing. Petr Gric, MBA, bytem Baarova 49/793, 140 00 Praha 4, nar. 26.7.1961, uděluji Českému vysokému učení technickému v Praze, Fakultě elektrotechnické (dále jen FEL) trvalý neodvolatelný souhlas se zveřejněním své disertační práce nazvané „Buzení synchronního motoru jako komplexní mechatronický systém“. Zveřejnění může předcházet obhajobě práce i recenznímu řízení.

Zároveň prohlašuji, že tato práce neporušuje autorská práva třetích osob a že jsem si vědom toho, že případné přihlášky k patentové ochraně je třeba podat před zveřejněním práce.

V Praze dne 31.4.2018

Ing. Petr Gric, MBA

Seznam vlastních publikací autora disertační práce

1. Publikace, které se vztahují k tématu disertační práce

1.1. Publikace v impaktovaných časopisech:

1.2. Publikace v recenzovaných časopisech

- P. Gric, D. Havelka, Budič synchronního motoru jako multifunkční zařízení, časopis Elektro 8-9/2017, str. 32-34, autorský podíl - P. Gric 80%, D. Havelka 20%

1.3. Publikace ostatní

- P. Gric, Automatické řízení kompresorů z hlediska platných vyhlášek Státní báňské správy, Praha 2011, Dalkia a.s.
- P. Gric, Studie proveditelnosti dálkového řízení TK v provozech Dalkia – OKD, Praha 2010-2011, Dalkia a.s.

2. Publikace ostatní

2.1. Publikace v impaktovaných časopisech:

2.2. Publikace v recenzovaných časopisech

- P. Gric, D. Havelka, P. Novák, Rychlonabíječe vozidel s elektrickým pohonem s alternativními zdroji napájení, časopis Elektro 3/2018, str. 43. Autorský podíl – P. Gric 70%, D.Havelka 15%, P. Novák 15%
- P. Gric, Specifikace uzavřených olověných akumulátorových článků pro staniční použití dle Eurobat, časopis Elektro, 6/1998, str. 8-12
- P. Gric, Rozváděče nouzového osvětlení s bezúdržbovými staničními bateriemi, příloha časopisu Elektro 11/1998, str. 2-6
- J. Jedlička, D. Havelka, P. Gric, Nikola si s Teslou rozumí – Rychlonabíjecí stanice pro Elektromobily – hardware, nebo služba?, časopis Elektro 3/2017, str. 82-84, autorský podíl - P. Gric 40%; D. Havelka 30%, J. Jedlička 30%
- P. Gric, V. Korenc, T. Bůbela, Náhrada zastaralých rotačních a statických střídačů, časopis Elektro, 9/2001, str. 66-68, autorský podíl – P. Gric 50%; V. Korenc 25%; T. Bůbela 25%;

2.3. Publikace ostatní

- p. Gric, Pohony těžních strojů s asynchronními motory s vinutou kotvou, Sborník XXXII konference o elektrických pohonech, str. 102-108, Česká elektrotechnická společnost, ISB 978-80-02-0238-1, Plzeň 2011
- P. Gric, J. Jedlička, D. Havelka, Rychlonabíječe pro elektromobily – hardware, nebo služba? Sborník XXXV konference o elektrických pohonech, CD nosič, blok IV.B/5, Česká elektrotechnická společnost, ISBN 978-80-02-02724, autorský podíl – P. Gric 40%; D. Havelka 30%, J. Jedlička 30%
- P. Gric, Systémy nouzového osvětlení s bezúdržbovými staničními bateriemi Oldham Espace FTR, časopis Energetika, 6/2000, str. 22-26

Poděkování

Děkuji svému otci, Ing. Rudolfu Gricovi, CSc., za cenné rady po celou dobu studia a za pomoc s konečnou korekturou disertační práce.

Děkuji prof. Ing. Jiřímu Pavelkovi, DrSc., duchovnímu otci budících systémů ČKD Elektrotechniky, za odborné a procesní vedení mého studia.

Poděkování patří také firmě innogy Gas Storage, s.r.o., které mi umožnila provozní testování a výzkumné měření na multifunkčních budičích PEG xxx/ μ P7.

Abstrakt

Moje disertační práce se zabývá analýzou budících soustav synchronních motorů a jejich možného komplexního využití. V mé disertační práci jsem se zaměřil na možnosti jejího mechatronického využití u pohonů turbokompresorů středních a větších výkonů.

V úvodu jsem popsal vize a cíle disertační práce a popsal současný stav problematiky budících souprav synchronních pohonů turbokompresorů. A to v třech technických úrovních.

Další oddíl se zabývá teoretickou analýzou jednotlivých komponentů soustrojí turbokompresorů, a to jak jeho elektrických, tak i mechanických částí.

Ve zvláštní navazující kapitole se zabývám technickou analýzou vlastností pohonných motorů turbokompresorů a to cíleně synchronních strojů, jejich elektrických a mechatronických vlastností.

V následující kapitole č. 4 analyzuji vlastnosti nového budícího systému PEG xxx/ μ P7, vyvinutého na základě výše popsaného výzkumu.

V závěru popisuji hlavní přínosy této disertační práce a reviduji splnění nastavených vizí a cílů.

Za velký přínos této práce považuji aplikační odzkoušení uvedených analýz a výzkumů. Proto v poslední kapitole uvádím výběr nejzajímavějších provozních nasazení navržených budících souprav PEG xxx/ μ P7.

Klíčová slova

Budič synchronního motoru, řízení účinníku, synchronizace, antipompážní regulace turbokompresoru, řízení synchronního motoru a turbokompresoru

Abstract

The dissertation thesis investigates the analysis of synchronous motor excitation systems and their possible complex utilisations. The focus is on the possibilities of mechatronic utilisation of the analysis of medium and large power turbocharger machines.

The introduction describes the aims and objectives of the project and explains the current theoretical (and practical solutions) of synchronous drives for turbochargers at three technical levels. The following section, concentrates on the technical analysis of individual components which make up turbocharger sets, including both the electrical and mechanical components.

The complementary chapter, examines the properties of propulsion engines for turbo-compressors, specifically focussing on synchronous machines and their electrical and mechatronic characteristics.

Chapter 4 describes the properties of the new PEG xxx / μ P7 Excitation System that has been developed for practical applications utilising theoretical conclusions conducted during this research project.

The conclusion evaluates the main benefits of this dissertation thesis and reviews the fulfilment of the aims and objectives set for the project

The practical applications from the research and theoretical analysis have the most significant contribution to this thesis, which is why the last chapter includes selected practical uses of the PEG xxx / μ P7 excitation sets.

Keywords

Exciter of a synchronous motor, power factor control, synchronisation of a synchronous motor, control of synchronous motor and turbo-compressor.

Obsah

1. Úvod.....	4
1.1. Vize disertační práce	4
1.2. Cíl disertační práce	6
2. Přehled současného stavu problematiky	7
2.1. Co je to mechatronika.....	7
2.2. Stav systémů řízení turbokompresoru a jejich rekonstrukce	8
2.2.1. Stávající systémy před rekonstrukcí, jejich stručná charakteristika	8
2.2.1.1. Ruční ovládání TK	8
2.2.1.2. Částečná automatika ovládání TK.....	12
2.2.1.3. Plná automatika ovládání TK, bez dálkového ovládání a vizualizace.....	14
2.2.1.4. Průzkum originality řešení	16
3. Teoretická analýza	21
3.1. Soustrojí turbokompresoru	21
3.1.1. Turbokompresory	21
3.1.1.1. Rozdělení.....	21
3.1.1.2. Použití turbokompresorů	22
3.1.2. Vlastnosti turbokompresoru z pohledu elektropohonu.....	24
3.1.2.1. Volba pohonného motoru turbokompresoru.....	24
3.1.2.2. Převodovky.....	25
3.1.2.3. Rozběh soustrojí turbokompresoru.....	25
3.1.3. Fáze provozu soustrojí turbokompresoru	27
3.1.3.1. Fáze přípravy ke spouštění	27
3.1.3.2. Fáze rozběhu soustrojí.....	28
3.1.3.3. Fáze zatěžování	30
3.1.3.4. Fáze ustáleného chodu - provoz	31
3.1.3.5. Fáze odstavování turbokompresoru.....	35
3.1.4. Stav pompáže turbokompresoru	36
3.1.4.1. Cyklus pompáže	38
3.1.4.2. Detekce a potlačení pompáže	38
3.1.4.3. Matematické určení hranice pompáže	40
3.1.5. Vibrace soustrojí turbokompresoru	43
3.2. Pohonné motory turbokompresorů	50
3.2.1. Pohon elektromotorem	50

3.2.1.1.	Synchronní motory	50
3.2.1.2.	Asynchronní motory	51
3.2.1.3.	Stejnoseměrné motory	51
3.2.2.	Synchronní stroje	51
3.2.2.1.	Synchronní stroje obecně	51
3.2.2.2.	Synchronní generátory	51
3.2.2.3.	Synchronní kompenzátory	52
3.2.2.4.	Synchronní motory	53
3.2.2.5.	Konstrukce synchronních motorů	53
3.2.3.	Buzení synchronních motorů, druhy a jejich vlastnosti	55
3.2.3.1.	Stacionární polovodičové budící zdroje	57
3.2.3.2.	Bezkontaktní budící systémy	58
3.2.4.	Problémy spojené s provozem synchronních strojů	61
3.2.4.1.	Konstrukce rotorového rozběhového vinutí – tzv. amortizéru	61
3.2.5.	Synchronizace	63
3.2.5.1.	Soustrojí s lehkým rozběhem	63
3.2.5.2.	Soustrojí se středně těžkým rozběhem	63
3.2.5.3.	Stroje s těžkým rozběhem	64
3.2.5.4.	Vliv zapojení rotorového obvodu při rozběhu synchronního motoru	66
3.2.5.5.	Synchronizace závěr	70
3.2.6.	Ochrany synchronních motorů – pohonů turbokompresorů	70
3.2.6.1.	Sdružené ochrany synchronních strojů	70
3.2.6.2.	Vstupy měřených veličin	71
3.2.6.3.	Ochranné funkce	71
3.2.6.4.	Logické funkce	72
3.2.6.5.	Záznamy o poruchách	73
3.2.6.6.	Uživatelské rozhraní	73
3.2.6.7.	Komunikace	74
3.2.6.8.	Ovládací a komunikační software	74
3.2.6.9.	Ochrana proti asynchronnímu chodu	74
4.	Analýza vlastností nového multifunkčního budícího systému pro řízení turbokompresorů	78
4.1.	Budič PEG xxx/ μ P7	78
4.1.1.	Základní regulační funkce	78
4.1.2.	Software budiče – hierarchie regulace – vybrané bloky	79
4.1.3.	Konstrukce regulační části	84

4.1.4.	Vizualizace provozních a poruchových stavů	85
4.1.5.	Konstrukce silové části	88
4.1.6.	Mechanická konstrukce stacionárních budících souprav PEG xxx/ μ P7	90
4.2.	Přepět'ová ochrana rotoru synchronního motoru	91
4.2.1.	Popis PEG POSM	91
4.2.2.	Hodnoty spínacích napětí POSM	93
4.2.3.	Rozběh soustrojí s POSM	94
4.2.4.	Konstrukční uspořádání POSM	96
4.3.	Analýza a popis nově navržené ochrany PEG 21 MD	97
4.3.1.	Požadavky na nově vyvíjenou ochranu PEG 21 MD	98
4.3.2.	Návrh ochrany PEG 21 MD	98
4.4.	Technologické funkce navrženého budiče PEG xxx/ μ P7	106
4.4.1.	Synchronizace a technologické řízení budiče při rozběhu synchronního motoru	106
4.4.2.	Analýza vibrací v multifunkčním budiči PEG xxx/ μ P7	113
4.4.3.	Antipompážní regulace a ochrana turbokompresoru	114
4.4.4.	Řízení buzení při dosažení limitních elektrických a výkonových parametrů	117
4.4.4.1.	Limita „Dosažení maximálního proudu“	117
4.4.4.2.	Limita „Minimální výkon“	118
4.4.4.3.	Limita „Dosažení maximálního výkonu“	118
4.4.5.	Technologický regulátor	119
4.4.6.	Další technologické a mechatronické funkce multifunkčního budiče	121
5.	Aplikační výsledky disertační práce	122
5.1.	Projekty, v kterých byly aplikovány výsledky disertační práce	124
6.	Přehled výsledků disertace, hlavní přínosy disertační práce	131
6.1.	Porovnání s existujícím řešením	132
6.2.	Zlepšení současného stavu	132
7.	Závěr	133
7.1.	Původní vědecký přínos	133
7.2.	Závěry pro další rozvoj vědy a realizaci v praxi.	133
8.	Zhodnocení dosažení cílů disertace	134
9.	Seznam značek a symbolů	135
10.	Seznam obrázků	138
11.	Použitá literatura	140

1. Úvod

1.1. Vize disertační práce

Vývoj a užité vlastnosti budičů synchronních strojů v současné době velmi pokročily. Nástupem mikroprocesorové techniky, digitální komunikace a scada systémů dosáhly vysoké úrovně i vizualizační funkce a způsoby komunikace s obsluhou. Umožňují vzdálenou správu a komunikaci, vzdálený dohled a servis. Vyspělé systémy buzení jsou variabilní, umožňují implementaci uživatelských funkcí a požadavků provozovatelů.

Kam dále ve vývoji budících systémů? Je nutné, aby budiče pouze „budily“? Není možné, aby plnily i další funkce, které mnohdy se samotným synchronním motorem nesouvisejí?

Tato vize není ničím ojedinělým. Mnoho výrobců elektrotechnických zařízení pochopilo, že přídatné „chytré“ funkce zvýší užitnou hodnotu zařízení. Mobilní telefony nejsou již dlouhou dobu přístroje pouze k telefonování, ale, paradoxně, funkce telefonu je funkcí podružnou, o které se v technických datech dnešních „chytrých“ telefonů prakticky ani nedomluvíte. Ale nezacházejme do jiných oborů. Např. elektrické ochrany motorů, transformátorů, vedení a jiných elektrických strojů a zařízení neplní dnes již pouze funkce ochrany – i když ty jsou velmi komfortní a sofistikované. Mají spoustu funkcí dalších – logické, monitorovací, záznamové, archivační a vizualizační.

Nešlo by jít stejnou cestou při vývoji nového budícího zařízení? Vhodnou možností by bylo využití přídatných funkcí pro retrofitové¹ aplikace soustrojí turbokompresorů. Zde je možné implementovat řadu mechatronických funkcí, které jsou velmi dobře využitelné ve spojení s řídicím systémem turbokompresoru. Tyto dodatečné funkce by byly jistě velkou konkurenční výhodou pro nabídku nových multifunkčních budících zařízení.

Produkcí budičů je možno rozdělit do dvou částí:

- výroba budičů pro nové synchronní stroje a aplikace s těmito stroji,
- retrofitové zakázky pro pohonářské aplikace se synchronními motory.

První aplikační možnost – výroba nových zařízení – je řízena výrobcem a dodavatelem zařízení; výrobce, resp. dodavatel synchronního motoru je většinou i výrobcem, nebo zadavatelem (sprostředkovatelem) dodávek budícího systému. Ten si stanovuje funkce i podmínky. Budiče, v současné době dodávané se synchronními motory, jsou většinou jednoúčelová zařízení, která reflektují pouze a jen požadavky daného zařízení. Jedná se např. o aplikace kontejnerových šroubových a turbokompresorů (synchronní motory), kogeneračních jednotek (synchronní generátory). V těchto případech vývoj kontroluje producent zařízení, nebo dodavatel celých systémů. Technické parametry jsou stanoveny a mnohdy i redukovány vzhledem k ekonomickým nákladům na výrobu.

¹ Retrofit je náhrada morálně a technicky zastaralého zařízení, nebo jeho ucelených komponentů za zařízení nové, za účelem zlepšení jeho technických parametrů. Jedná se o technické zhodnocení zařízení. /Slovník cizích slov/

Větší prostor pro nová technická řešení je u druhé možnosti – retrofitových aplikací. Těch je stále poměrně mnoho, technická zařízení (turbokompresory a turbogenerátory) vyrobená v 70-tých a 80-tých letech minulého století jsou stále ve velmi dobrém technickém (strojním) stavu; proto jejich rekonstrukce jsou vhodné a přinesou značná technická zhodnocení.

Projektové organizace, realizující retrofitové projekty velkých strojních zařízení, jakými jsou již zmiňované turbokompresory středních a větších výkonů se synchronními motory, „sestavují“ celý řídicí systém z jednotlivých komponentů. Je to pochopitelné, tak to dříve bylo; systém se skládal z části elektro, měření, ovládání motoru, části strojní, ochran strojního zařízení a jeho ovládání. Tyto části byly umístěny v oddělených rozváděčích; byly také odděleny i komunikačně. Rekonstrukce byla rozdělena i oborově, strojní část – část elektro. Tyto části měly společné pouze některé, nejnnutnější signály. Mnohé informace se shromažďovaly separátně, pro každou část zvlášť. Vznikaly zbytečné duplicity a nepřesnosti. To popírá známou zásadu: Každá veličina musí být měřena a vizualizována pouze jednou. Pokud tomu tak není, dostaneme, díky chybám měření, vždy rozdílné hodnoty.

Myšlenka, vyhodnocovat a řídit některé logické a mechatronické funkce soustrojí turbokompresoru v buzení synchronního motoru je nová, doposud nepublikovaná a neaplikovaná. Toto tvrzení dokládám v kapitole č. 2 „Přehled současného stavu problematiky“, dále v kapitole č. 2.2. „Stav systémů řízení turbokompresoru a jejich rekonstrukce“, a v kapitole 2.2.1.4. „Průzkum originality řešení“.

Proč nevyhodnocovat v bloku buzení provozní a poruchové a stavy a chování, které s problematikou napájení rotoru synchronního motoru budícím proudem nesouvisí? V systému buzení máme k tomu všechny potřebné údaje a nástroje, které musíme v regulaci strojní části někdy velmi náročně získávat. Vývoj hardware s novými nadstandardními možnostmi softwarové a paměťové kapacity, rychlosti zpracování, přístupovými a komunikačními možnostmi umožňuje implementovat funkce, které by v minulých hardwarových verzích byly nerealizovatelné.

Důvodem, proč se do toho nikdo doposud nepouštěl, je mezioborová bariéra mezi techniky elektropohonů a techniky strojní a regulační části. S touto „barierou“ jsem měl možnost se setkat při své účasti v týmech, které navrhovaly, projektovaly, zkoušely a uváděly do provozu pohony s kompresory různých typů a výkonů. Řídicí systémy se vyvíjely a vyvíjejí v rámci dané odborné skupiny.

Výjimkou jsou centrální řídicí systémy, které řídí komplexní výrobní technologie a procesy. I v těchto případech jsou však u speciálních regulací a řídicích funkcí zřizovány lokální řídicí ostrůvky, které jsou dodávány s danou technologií, či zařízením, které potom s centrálním řídicím systémem komunikují po sběrnici výměnou stavových, poruchových a analogových veličin. Stejně tak je tomu i u budících systémů.²

Na základě výše uvedených informací je zde prostor pro implementaci některých mechatronických funkcí do regulační a logické části budiče, tzn. regulačních a logických

² Výjimkou jsou řídicí systémy generátorů a turbín vodních elektráren firmy ZAT, které byly navrhovány s opačnou filosofií a centralizací řídicích funkcí všech bloků do jednoho řídicího systému. Samotný budič zde zajišťuje pouze základní regulační funkce a ostatní budící funkce jsou realizovány v nadřazeném ŘS. Řízení technologií vodních elektráren (VE) je však odlišná problém, proto se touto problematikou nebudu dále zabývat.

bloků, které spojují doposud funkčně oddělené bloky strojní, elektro části a části řízení. Tato myšlenka je zcela nová a dle mých informací doposud nepublikovaná a

1.2. Cíl disertační práce

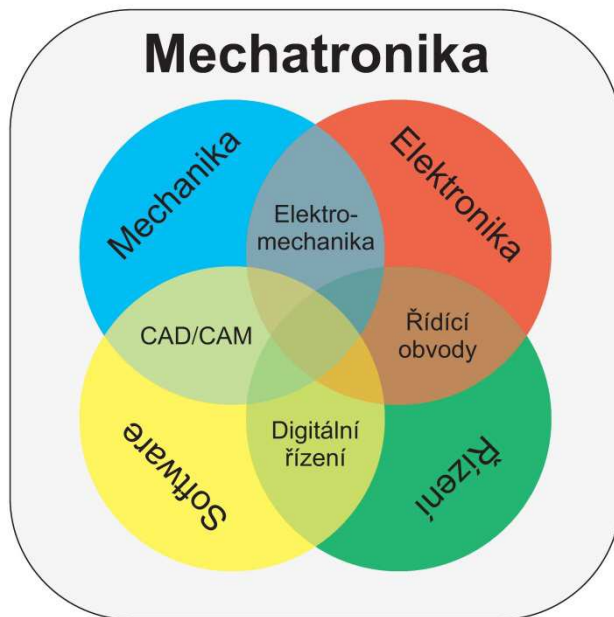
Na základě vize, popsané v předchozí kapitole, jsem stanovil cíl své disertační práce a jeho realizaci v následující struktuře:

1. Návrh nového multifunkčního mechatronického budícího systému synchronního pohonu turbokompresoru
2. Návrh metod ovládání a ochran synchronního motoru (příprava, rozběh, synchronizace, poruchové stavy – asynchronní chod)
3. Analýza provozních a poruchových parametrů soustrojí turbokompresoru z pohledu budícího systému
4. Návrh a analýza vlastností a funkcí nového mechatronického budícího systému a jeho periferií
5. Softwarová implementace automatizovaného řízení turbokompresoru do budícího systému

2. Přehled současného stavu problematiky

2.1. Co je to mechatronika

„**Mechatronika** je součinná kombinace mechaniky, elektroniky a softwarového inženýrství. Účel tohoto mezioborového inženýrského oboru je studium automatů z inženýrského pohledu a slouží k řízení vyspělých hybridních systémů.“ [1]



Obrázek 1 - Mezioborová synergie mechatronického pojetí návrhu systému řízení

Mechatronika slučuje mechaniku, elektroniku a výpočetní techniku, které dohromady tvoří komplexní systém, zahrnující ucelenou problematiku jmenovaných oborů.

Lze říci, že velmi příbuzné obory jsou elektromechanické systémy a řízení a automatizace; mechatronika je však ucelenější pohled na komplexní regulační soustavy. [2]

Mechatronika přináší možnost realizovat dosud nemožné funkce zařízení, snížení ekonomických požadavků na zařízení a multifunkčnost zařízení navrhovaného mechatronicky.

Pokud se zamyslíme nad principem mechatroniky zjistíme, že elektrotechnika jako obor není cílem, ale pouze jedním z nástrojů tohoto mezivědního oboru. Toto bylo možná v minulosti nepřijatelné pro řadu vývojových techniků, projektantů, konstruktérů a výpočtářů. Uvědomovali si to však zkušební a najížděcí technici, kteří zkoušeli, uváděli do provozu a revidovali celý komplexní systém, jehož cílem bylo vytvořit produkt, jež nemá žádnou vazbu a souvislost s problematikou pohonů a elektrotechniky.

Jedním z příkladů aplikace principů mechatroniky jsou rotační kompresory a odstředivá čerpadla poháněná synchronními motory. Nedílnou součástí synchronního motoru je jeho budicí soustava. Moderní budicí systémy jsou vybaveny mikroprocesorovým řízením, které značným způsobem rozšířilo jejich regulační, komunikační a vizualizační možnosti. Aplikace principů mechatroniky do budících soustav synchronních pohonů je v tomto případě logickým možným využitím budicí soustavy.

Moje disertační práce je věnována řízení systémů pohonů se synchronními stroji z mechatronického pohledu.

2.2. Stav systémů řízení turbokompresoru a jejich rekonstrukce

[3]

Česká republika, především koncern ČKD Praha, závody Kompresory a Elektrotechnika, byly renomovanými výrobci kompresorů a jejich pohonů, mimo jiné turbokompresorů středních a velkých výkonů. ČKD realizovalo dodávky systémů s turbokompresory po celém světě; závod ČKD DIZ je montoval a uváděl do provozu jako zakázky „na klíč“.

Jenom do České republiky se jich od 50-tých let minulého století dodaly stovky kusů a to především do těžebních oblastí (Ostravsko-Karvinsko, Kladensko a další), do hutního a chemického průmyslu, automobilového průmyslu a dalších oblastí. Mnoho soustrojí bylo dodáno do sousedního Polska a Maďarska, ale především do zemí bývalého SSSR.

Turbokompresory ČKD se vyznačovaly dlouhou životností a velmi dobrými technickými vlastnostmi. Do dneška jsou tyto kompresory funkční; po mechanické stránce jsou ve výborném stavu a je predikce jejich další dlouhé doby života. Proto probíhají jejich repase a rekonstrukce jejich napájení, řízení, vizualizace a ovládání.

2.2.1. Stávající systémy před rekonstrukcí, jejich stručná charakteristika

[3] Podle stavu techniky v době výroby je možno tyto systémy rozdělit do třech kategorií, dle stupně automatizace.

- ruční ovládání
- částečná automatika
- plná automatika s místním ovládáním

2.2.1.1. Ruční ovládání TK

Popis systému

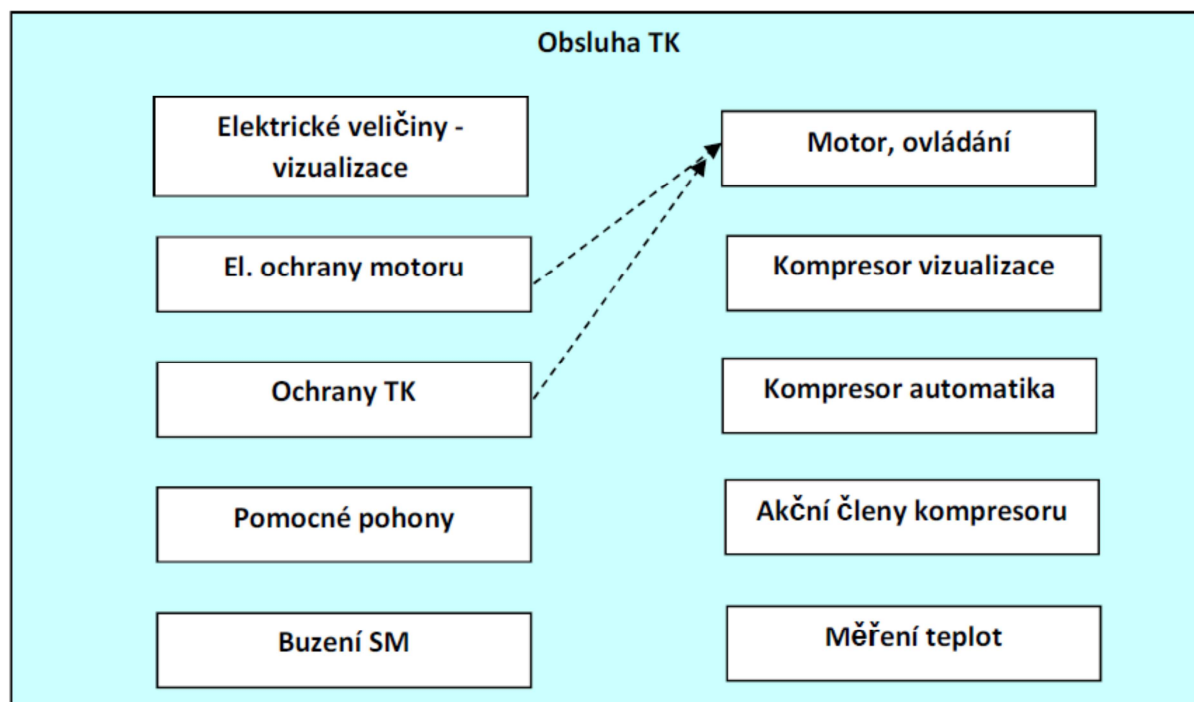
Tento systém je charakterizován prakticky nulovou automatizací. Všechny úkony, jak na elektropohonu, tak na vlastním kompresoru a pomocných pohonech vykonává obsluha. Pouze operace, které zajišťují bezpečnost provozu (elektrické a mechanické ochrany) a časové sekvence jsou zajišťovány klasickou reléovou logikou s vazbou na ovládání synchronního motoru (jeho odstavení a vizualizaci poruch). Blokové schéma ručního ovládání je na obr. č. 2.

Ovládání elektromotoru

Ovládání elektromotoru je ruční, z předního panelu rozváděče, se základní vizualizací elektrických veličin a základní technologickou sekvenční automatikou (časová relé, elektromechanický programátor), s návazností na ovládání pomocných pohonů.

Vizualizace elektrických a stavových veličin

Pouze panelovými analogovými přístroji a mechanickými ukazateli na ovládacím rozváděči pohonu, bez možnosti dálkové signalizace.



Obrázek 2 - Blokové schéma ručního ovládání turbokompresoru

Ochrany elektromotoru

Elektromotor je hlídán klasickými elektromechanickými ochranami se sumární signalizací na panelu ovládacího rozváděče a na vlastní ochraně. Klasicky jsou osazeny ochrany nadproudové, zkratové, rozdílové (pouze u větších pohonů) a ochrany proti podbuzení (asynchronnímu chodu). Vypínací relé ochran působí přímo na hlavní vypínač motoru. Teploty elektromotoru jsou hlídány čidly teploty PT 100 (jsou umístěny ve statorovém vinutí) s vyhodnocovači, některé „s“ a některé „bez“ hlídání limitních stavů.

Ovládání pomocných pohonů

Pomocné pohony jsou ovládány z panelu ovládání TK, bez sledování návazností. Jedná se o ruční ovládání, závislé pouze na obsluze.

Buzení SM



Obrázek 3 - Nastavení budícího proudu derivačního dynama

Budiče jsou rotační, převážně derivační dynama na společné hřídeli se soustrojím. Buzení je derivační, ovládá se ručně, s kruhovým ovladačem na předním panelu rozváděče pohonu – viz obr. č. 3. To umožňuje pouze ruční nastavení budícího napětí, bez možnosti automatické regulace dodávané jalové energie. Vzhledem k nebezpečí výpadku ze synchronizmu jsou elektropohony provozovány většinou v přebuzeném stavu (což v současné době

představuje nebezpečí penalizace za dodanou kapacitní jalovou energii).

Ovládání kompresoru

Ovládání kompresoru je ruční, z panelu ovládání. Ovládací armatury (olej, voda) jsou ovládány také ručně, nebo elektropohonem. Regulační armatury (sání, výtlak a antipompáž) jsou řízeny hydraulicky, nebo pneumaticky.

Regulace výstupního tlaku a antipompážní regulace

Je zajištěna automaticky pomocí hydraulických (tryskových) nebo pneumatických regulátorů (vzhledem k nedostupnosti ND a stáří mnohdy nefunkčních, proto je prováděna pouze ručně obsluhou)

Vizualizace neelektrických veličin

Tlaky médií (voda, olej, vzduch) jsou měřeny dálkovými manometry, pomocí impulsního potrubí. Teploty médií, ložisek a motoru jsou měřeny místními bimetalovými, nebo rtuťovými teploměry, u novějších soustrojí jsou osazena čidla PT 100 s vyhodnocovacími a ukazovacími přístroji v ovládacím panelu.

Ochrany kompresoru

Hlídní axiálního posuvu rotoru turbokompresoru zajišťují hydraulické hlídače axiálního posuvu (nejdůležitější ochrana TK). Teploty turbokompresoru jsou měřeny čidly teploty PT 100 a bimetalovými a rtuťovými teploměry a jsou hlídány vyhodnocovači s komparací limitních stavů. Čidla teploty jsou umístěna ve sledovaných částech TK.

Tlaky sledovaných veličin (olej, voda) jsou sledovány kontaktními manometry, nebo manostaty s hlídáním nastavitelných limitních stavů (mezí).



Obrázek 4 - Pohled na ovládací rozváděče turbokompresoru 16 000 m³/hod, důl ČSM Jih

Na obrázku č. 4 je typický pohled na ovládací rozváděče turbokompresoru ETK 16 z padesátých a šedesátých let minulého století. Tento systém ovládací byl zrekonstruován v roce 2013 již s novým multifunkčním buzením PEG 250/μP7.

Shrnutí

Jak je patrné z předcházejícího popisu a je názorně vidět na obrázku č. 2 a 4, jsou jednotlivé bloky (mechanický, elektrický a pomocné pohony) systému oddělené a nemají spolu žádné propojení. To obstarává pouze obsluha, která na základě svých znalostí a zkušeností provádí technologické a regulační zásahy. Není nijak zajištěna součinnost s jinými zdroji tlaku při výpadcích, nebo změně zdrojů tlaku.

Uchovávaní a archivace elektrických a neelektrických veličin je pouze manuální a spočívá v periodickém ručním zapisování vybraných provozních elektrických a neelektrických veličin.

Ač to vypadá možná neuvěřitelně, takovýchto systémů pracuje (a pracuje spolehlivě) ještě mnoho. Dlouhá životnost starých zařízení, jak motorů, tak i převodovek a kompresorů slibuje ještě možnost dlouhého provozu.

Právě tyto systémy jsou ideální pro komplexní rekonstrukci, protože životnost strojní části je, při pravidelném servisu a kontrolách, odhadována ještě na cca 30 let.

2.2.1.2. Částečná automatika ovládání TK

Popis systému

[3] Některé operace a procesy, které probíhají v tomto systému, jsou zautomatizované, většinou však reléovou logikou, v některém případě i jednoduššími LA. Tyto automatiky jsou instalovány pro částečné omezení, nebo vyloučení chyb v ovládání, způsobené lidským faktorem, nikoliv však s cílem zajistit bezobslužnost celého systému. Regulace výstupního tlaku je automatická, řízená elektricky, nebo hydraulicky, stejně tak i antipompážní regulace. Ovládání pomocných pohonů je částečně automatické, umožňuje však i ruční řízení.³

Ovládání elektromotoru

Ovládání elektromotoru je ruční, z předního panelu rozváděče, se základní vizualizací a základní technologickou sekvenční automatikou. Ta je realizována mechanickým programátorem, nebo časovými relé. Nájezd pohonu (příprava, rozběh) je možné provést automaticky, start a stop je prováděn obsluhou z panelu ovládání. Signalizace provozních a poruchových stavů je signálkami také na panelu ovládání.

Vizualizace elektrických veličin

Pouze panelovými přístroji na ovládacím rozváděči pohonu, bez možnosti dálkové signalizace.

Buzení SM

Budiče jsou stacionární, nebo bezkontaktní, s částečnou automatikou (regulace na $\cos \varphi$ nebo I_b), většinou povely více/měně. Budiče již mají nastaveny limity, zabraňují výpadku motoru ze synchronizmu.

Ochrany elektromotoru

Elektromotor je hlídán klasickými elektromechanickými ochranami se sumární signalizací na panelu ovládacího rozváděče a na vlastní ochraně. V některých případech jsou osazeny již modernější sdružené ochrany. Klasicky jsou osazeny ochrany nadproudové, zkratové, rozdílové (pouze u větších pohonů) a ochrany proti asynchronnímu chodu. Vypínací relé ochran jsou zapojena přímo na vypínací obvody hlavního vypínače motoru. Teploty

³ Takovéto řízení TK pracuje dodnes v Železárnách Podbrezové (3x TK 16 000 m³.hod⁻¹) a do svého odstavení v 03/2017 na dole Staříč (50 000 m³.hod⁻¹) a Paskov (32 000 m³.hod⁻¹).

elektromotoru jsou měřeny čidly teploty PT 100, které jsou umístěny ve statorovém vinutí, a hlídány vyhodnocovači s komparací limitních stavů.

Ovládání pomocných pohonů

Pomocné pohony (čerpadla oleje, čerpadla chladicí vody, ventilační systémy a další) jsou ovládány z panelu ovládání turbokompresoru, s automatikou přípravy kompresoru. Start kompresoru je možný po splnění daných podmínek.

Ovládání kompresoru

Ovládání kompresoru je ruční, z panelu ovládání. Ovládací armatury (olej, voda, výtlak vzduchu) jsou ovládány tlačítky více/méně, tzn. elektricky (elektropohonem), sekvence jsou reléové, někdy řízené LA. Regulační armatury (sání a antipompáž) jsou řízené hydraulicky, nebo pneumaticky.

Regulace výstupního tlaku a antipompážní regulace

Je zajištěna automaticky většinou pomocí elektropohonů.

Vizualizace neelektrických veličin

Tlaky médií (voda, olej, vzduch) jsou měřeny dálkovými manometry, pomocí impulsního potrubí. Teploty médií, ložisek a motoru jsou měřeny čidly PT 100 s vyhodnocovacími a ukazovacími přístroji v ovládacím panelu.

Ochrany kompresoru

Hlídání axiálního posuvu rotoru TK zajišťují hydraulické hlídače axiálního posuvu. Teploty turbokompresoru jsou měřeny čidly teploty PT 100 a jsou hlídány vyhodnocovači s komparací limitních stavů. Čidla teploty jsou umístěna ve sledovaných částech TK.

Tlaky sledovaných veličin (olej, voda) jsou sledovány kontaktními manometry, nebo manostaty s hlídáním nastavitelných limitních stavů (mezí).

Shrnutí

Na tomto stupni automatizace je většina kompresorů z 80-tých a začátku 90-let. Algoritmy spínání a regulace jsou částečně hlídány reléovou logikou, nebo mechanickými kontroléry. Značná část rozhodnutí a manipulačních zásahů (zatěžování a odlehčování kompresorů, nájezdy a odstavování, nastavování provozních veličin (žádaný výstupní tlak, buzení SM, hladina napětí pro start kompresoru a provoz a další) je na obsluze, což opět klade velké nároky na její kvalifikaci a zkušenosti. Neexistuje prakticky žádná vazba mezi ovládaním a diagnostikou motoru a kompresoru. To jsou dvě oddělené části, jejich vazby zajišťuje pouze obsluha. Archivace dat probíhá ručně, nebo mechanickými analogovými zapisovači.

2.2.1.3. *Plná automatika ovládání TK, bez dálkového ovládání a vizualizace*

Popis systému

Chod turbokompresoru je zautomatizován. Většinou se jedná o logická řízení, která jsou oddělená pro motor a kompresor, vizualizovaná a ovládaná jsou však centrálně. Ovládání je z velínu pomocí počítače; místní ovládání funguje jako havarijní (nouzové).

Tento systém se nejvíce blíží myšlence bezobslužného provozu. Je zde však stále velká bariéra mezi strojní částí a částí elektro. Pokud jsou využívány ve strojní části veličiny elektro, nebo naopak, snímají se duplicitně zvlášť pro každou část.

Principiální schéma automatiky ovládání je na obr. č. 5.

Ovládání elektromotoru

Řídí LA, včetně přípravy startu a hlídání splnění technologických podmínek. Řízení chodu pomocných pohonů je také automatické, s možností ručního ovládání. Motor je možné startovat z technologických rozváděčů, nebo z počítače, který je umístěn v kabině strojníka.

Vizualizace elektrických veličin

Na displeji lokálního ovládání, na panelových přístrojích na panelech ovládání a na technologickém snímku počítače, umístěném ve velínu kompresorové stanice.

Buzení SM

Je stacionární, polovodičové s automatikou na $\cos \varphi$ nebo I_b . Budič je řízen z technologického regulátoru binárními signály více/méně. Budiče již mají nastaveny limity, zabraňují výpadku motoru ze synchronizmu.

Ochrany elektromotoru

Elektromotor je hlídán již modernějšími sdruženými motorovými ochranami. Vypínací relé ochran jsou zapojena přímo na vypínací obvody hlavního vypínače motoru. Ochrany mají záznamníky poruch, kde lze vyčíst hodnoty a časy působení jednotlivých článků ochrany. Teploty elektromotoru jsou hlídány čidly teploty PT 100, které jsou umístěny ve statorovém vinutí a jsou hlídány vyhodnocovači s komparací limitních stavů, nebo automatickými ústřednami pro vyhodnocování teplot.

Ovládání pomocných pohonů

Jsou ovládány automatikou přípravy kompresoru, start kompresoru je možný až po splnění daných podmínek. Alternativně ručně z pracoviště manipulanta, nebo přímo z rozváděče pomocných pohonů.

Ovládání kompresoru

Ovládání kompresoru je automatické, s možností ručního ovládání jednotlivých armatur, z řídicího počítače. Ovládací armatury (olej, voda, výtlak vzduchu) tlačítka více/méně, tzn. elektricky (elektropohonem), sekvence řízené LA.

Regulace výstupního tlaku a antipompážní regulace

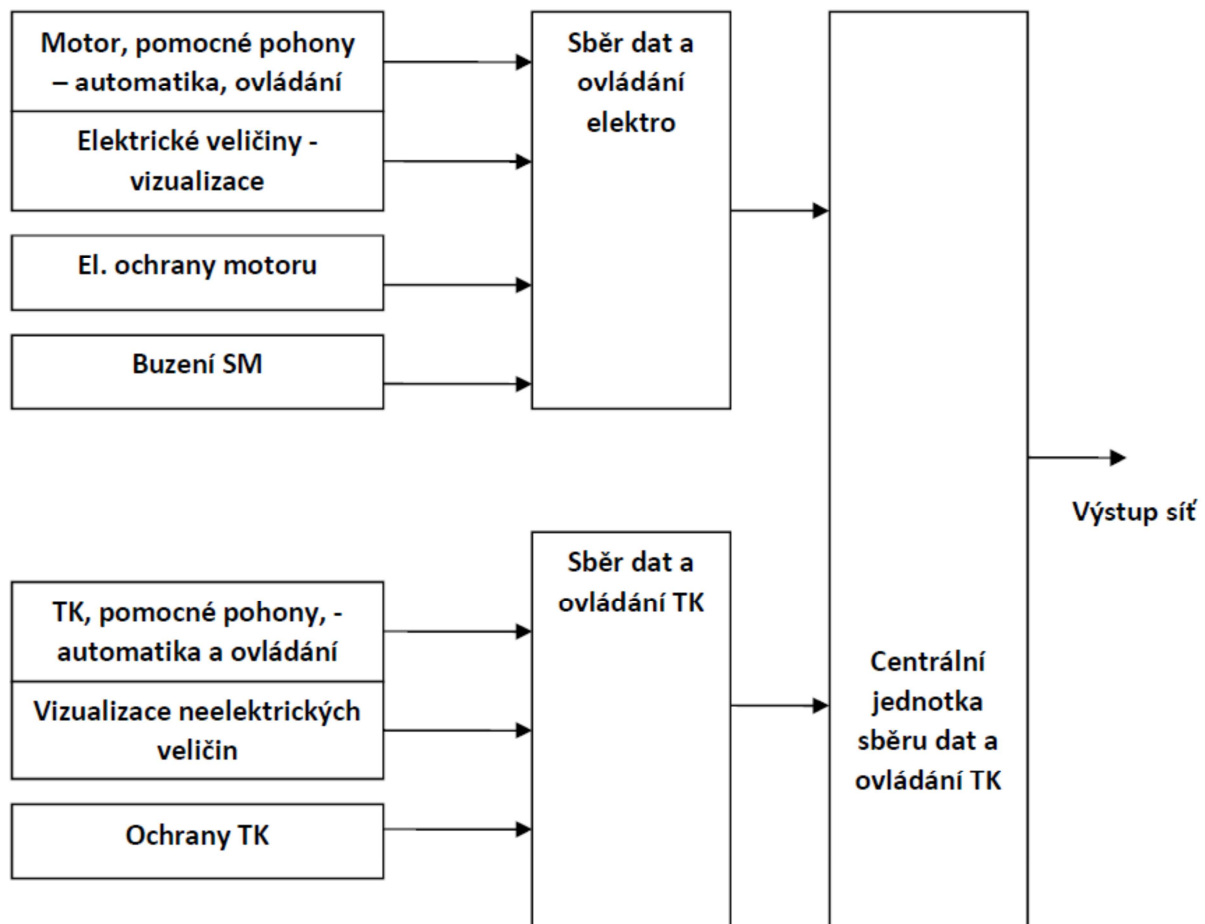
Je zajištěna automaticky většinou pomocí elektropohonů.

Vizualizace neelektrických veličin

Tlaky médií (voda, olej, vzduch) a teploty ložisek, olejů, vzduchů atp. jsou měřeny převodníky tlaku a teploty s výstupním analogovým signálem 4-20 mA, resp. odporovým signálem (PT 100). Tento signál je digitalizován a zobrazen na operátorském panelu. Tyto veličiny bývají často nezávisle snímány a vizualizovány na ovládacích panelech turbokompresoru.

Ochrany kompresoru

Hlídní axiálního posuvu rotoru TK zajišťují hydraulické hlídače axiálního posuvu. Teploty turbokompresoru jsou sledovány řídicím systémem a při překročení limitních stavů ŘS provádí příslušný zásah (signalizace, odstavení).



Obrázek 5 - Principiální schéma automatiky ovládání kompresoru

Závěr

Na výše uvedeném obrázku č. 5 je patrná bariera mezi technologickou strojní částí a částí elektro. Jak jsem již uvedl výše, problém, či nedostatek je v duplicitě snímání a

vyhodnocování elektrických veličin ve strojní části, nebo veličin mechanických v části elektro.

Protože jednotlivé bloky mechanické, logické a elektrické nemají přímou vzájemnou vazbu, systém nemá a nemůže mít komplexní přehled nad chováním celého systému, vytvářet predikce chodu a další důležité vlastnosti. Pokud jsou požadavky na některé neexistující funkce, jsou tyto řešeny nadstavbami a dodatečnými regulačními bloky, jak softwarovými, tak hardwarovými. Celý systém tímto pouze zvyšuje svoji složitost a nepružnost.

Tento systém neumožňuje sledovat potřeby údržby systému, nevyhodnocuje zhoršování mechanických stavů (vibrace, teploty), které ukazují na nutnost servisních zásahů.

2.2.1.4. Průzkum originality řešení

Výzkumu, vývoji a typovým zkouškám budících systémů se věnuji již více než 30 let. Téma diplomové práce, kterou jsem zpracovával v roce 1983-1985, byly zkoušky nového silového bezkontaktního budícího systému buzení pomocí asynchronního motoru, který se otáčí proti směru svého magnetického pole (tzv. protiběžný budič). Tento systém nebyl dlouhá léta využíván. V poslední době však našel uplatnění při buzení synchronních motorů napájených ze zdrojů proměnné frekvence (synchronní ventilový motor, frekvenční měnič), kdy je zapotřebí nabudit stroj i ve stojícím stavu, což tyto budiče umožňují.

Nejvíce používaným bezkontaktním budičem je v současné době budící generátor s budícím vinutím na statoru a střídavým vinutím s neřízeným usměrňovačem na rotoru. Tento systém buzení se ukázal jako výrobně a technicky jednoduchý a tím i spolehlivý. Tyto budiče se dnes vyrábí v mnoha výrobních závodech v mnoha modifikacích a jsou považovány za standard. Za dobu mé praxe v závodě ČKD Elektrotechnika i posléze (od roku 1990) ve firmě PEG jsem měl možnost (a de facto profesní povinnost) sledovat vývojové trendy v oblasti budících zdrojů a to jednak jejich silových částí, tak i částí regulační. Při zkouškách, uvádění do provozu a servisu budících systémů a pohonů ČKD Elektrotechnika a PEG jsem se setkával s odborníky spolupracujících firem, a to nejenom z oboru elektrotechnického, ale i oborů strojních a MaR (měření a regulace), s nimiž jsem měl možnost si vyměňovat informace o vývojových trendech a novinkách z oborů strojního, elektro i dalších.

I má účast v odborných posudkových komisích, výběrových a školicích komisích a dalších odborných skupinách mi udržuje trvalý kontakt s danou problematikou elektrických pohonů a buzení synchronních strojů. Za dobu své praxe jsem byl mnohokrát vyzván ke zpracování odborných posudků a studií k danému tématu např. [3] [4]

Odborný záběr zkušebních techniků, tak jak bylo standardem v závodech ČKD, byl vždy mezioborový. Od nich se vždy očekávalo komplexní řešení problémů; elektrotechnických, mechanických a strojních. Je to pochopitelné, protože ty s provozem elektropohonů úzce souvisejí. Aby bylo možno lokalizovat problém, či nestandardní chování, bylo nutné studovat chování celého systému, nejenom elektropohonu.

Svojí vizi, tj. doplnění nového budicího systému o další „neelektrické“ funkce, jsem konzultoval s mnoha odborníky strojího oboru a to nejenom s kompresoráři, ale i vývojovými techniky výrobců velkých ventilačních systémů a dmychadel. Mé konzultace a kontakty nejsou omezeny pouze na Českou republiku. Měl jsem možnost spolupracovat se servisními techniky kompresorů v Polsku (Huta Katowice, důl Silesia – Pg Silesia Czechowice-Dziedzice), s vývojovými techniky firmy Ganz Maďarsko (se kterými jsem připravoval vývoj budicího systému hydrogenerátorů), s techniky italské firmy Ansaldo a dalšími zahraničními odborníky.

Nikde jsem se nesešel ani s řešením, které by se přiblížilo mé vizi multifunkčního budicího systému s mechatronickými funkcemi, ale ani s požadavkem na takovéto řešení, tzn., že o něm zatím nikdo neuvažoval.

Technické informace o této problematice jsem se také snažil zjistit v technické literatuře, a to především zahraniční. V současné době není k dispozici relevantní česká odborná literatura, která se aktuálně zabývá tématem přídavných funkcí budičů synchronních motorů. Ani zde jsem nenalezl zmínky o problematice, kterou se zabývám ve své disertační práci

Firemní (komerční) dokumentace

Nejvíce souvisejících informací jsem nalezl v dokumentaci výrobců (produktové datascheety, technické informace výrobků...) [5]; [6]; [7]; [8]; [9]. Nejblíže mé vizi jsou budicí systémy generátorů fy. Brush, které implementují některé funkce řízení generátorů, jako start/stop turbín, synchronizační funkce, hlídání provozních stavů.

Některí výrobci, (ABB, ZAT) [5] jdou cestou opačnou, kdy implementují funkce budicí do nadřazeného systému. I zde se jedná především o budicí systémy generátorů.

Budicí systémy, o nichž se mi podařilo zajistit relevantní informace, nebo budicí systémy, které znám z osobní zkušenosti, jsou funkčně uzavřené systémy, neumožňující uživatelské přizpůsobení. Tento fakt je pochopitelný, protože u sériově vyráběných produktů, jsou zákaznické aplikace velmi nákladné a systémově velmi těžko realizovatelné.

Novost funkčních řešení

Některé z funkcí, které chci implementovat do nového mechatronického budicího systému synchronních pohonů turbokompresorů středních a velkých výkonů, chci realizovat principiálně na jiných základech, jež nebyly, dle mých průzkumů, doposud publikovány.

Jedná se především o:

- ochranu proti asynchronnímu chodu,
- přepěťovou ochranu rotoru synchronních motorů,
- antipompážní ochranu turbokompresorů.

V dalších odstavcích chci vyzdvihnout novost navržených řešení.

Ochrana proti asynchronnímu chodu

Ochrana proti asynchronnímu chodu je vždy realizovaná v souboru ochran, ať již jako diskretní článek ochrany, nebo součást sdružených motorových ochran [10]; [11]; [12]; [13];

[14]; [15]; [16]. Aplikováním ochrany proti asynchronnímu chodu do budícího systému nenahradíme nutnost instalace této ochrany do souboru ochran synchronního stroje, ale pouze ji zdvojíme. Z mých dlouhodobých zkušeností vím, že tyto ochrany jsou, z důvodu nesprávného nastavení a velmi komplikovaného zkoušení, mnohdy nefunkční. Hlídní havarijního asynchronního chodu na jiném, nezávislém místě je proto velmi přínosné pro zvýšení bezpečnosti chodu synchronních strojů.

Díky nefungujícím ochranám proti asynchronnímu chodu došlo v minulosti k několika haváriím, kterým by fungující ochrany zabránily. Jedná se např. o havárii 4 MW pohonu boxerkompresoru v Podzemním zásobníku plynu innogy v Dolních Dunajovicích. Díky zablokovanému rotoru (zasunuté natáčedlo v provozní poloze) se pohon nerozběhl, ochrana proti asynchronnímu chodu jej neodstavila a po cca 30 s. došlo k vytavení spojek amortizéru a následné poruše vinutí statoru. U tohoto pohonu byla nefunkční ochrana proti asynchronnímu chodu D21.

K obdobnému problému došlo v 03/2017 na synchronním motoru 3,25 MW, který pohání důlní ventilátor na dole ČSM Jih. Po závadě na budiči nedošlo k odstavení stroje. Motor pracoval v asynchronním chodu po dobu cca 5 hodin, aniž by si toho obsluha všimla. Zde nedošlo k provozní havárii, nicméně při následné revizi bylo zjištěno poškození klece amortizéru, která musela být potom nákladně opravena. Zde však byla, na rozdíl od předešlého případu, instalovaná moderní sdružená ochrana ABB REM 630, avšak se špatně nastaveným článkem ztráty synchronizace.

Známé ochrany vyhodnocují asynchronní chod na impedančním principu, kde parametrem je poměrná příčná reaktance stroje v nasyceném stavu $x_{q \text{ sat}}$. Tato hodnota není u synchronních strojů standardně udávána (není to štítkový údaj, ani většinou není obsažená v dokumentaci, která je dodávána se synchronním strojem). Je měřena v rámci prototypových zkoušek a je uvedena pouze v protokolu o typových zkouškách. Tento dokument je však interním dokumentem výrobního závodu (pokud si prototypové zkoušky neobjedná a nehradí zákazník). Hodnotu $x_{q \text{ sat}}$ je proto možno získat pouze dotazem ve výrobním závodě.

Revize a zkoušení ochrany proti asynchronnímu chodu je také problematické a revizní technici ji mnohdy nedokáží nastavit a následně odzkoušet. Proto jsem (ve spolupráci s revizním technikem fy. Bastro Ing. Fojtíkem), vytvořil předpis pro zkoušení a nastavování této ochrany. [17]

Problémem nefunkčnosti těchto ochran byl způsob vyhodnocování asynchronního chodu, který nesleduje vlastní skutečnost asynchronního chodu, ale vyhodnocuje asynchronní chod na impedančním principu meze statické stability. Na tomto principu precizovaném, díky nástrojům digitální techniky, pracují i články ztráty synchronizace v současné době používaných sdružených ochran [10]; [11]

Tyto negativní vlastnosti jsem odstranil novým principem vyhodnocování asynchronního chodu pomocí definované komparace účinku, který popisují v kapitole 4.4. Tento způsob vyhodnocení má následující výhody:

- není zapotřebí žádných nastavovacích parametrů – je sledováno chování stroje a vyhodnocen pólový prokluz,

- funkčnost ochrany je možno ověřit při každém asynchronním rozběhu stroje,
- umožňuje eliminovat ojedinělé prokluzu, ke kterým dochází vlivem kolísání napětí sítě, nebo jiných přechodových dějů.

Z dostupné literatury, dokumentace výrobců ochran a mých zkušeností tohoto principu žádný výrobce nepoužívá. Jedná se tedy o nový přínos mé disertační práce.

Přepět'ová ochrana rotoru synchronních strojů

Princip nově navržené přepět'ové ochrany tak, jak jej popisují v kapitole 4.2., není principiálně nový. Byl používán již v ČKD Elektrotechnice pro přepět'ové ochrany bezkontaktních budičů typů SBM a RBN (jednotka UZP 211/217). Pro nový budič jsem však tuto ochranu zkonstruoval na nové součástkové bázi (použití lavinových diod – trisilů) a navrhl novou signalizaci sepnutí přepět'ové ochrany. Tato funkce je velmi důležitá pro ověřování správného chodu této ochrany.

Antipompážní ochrana turbokompresoru

Stav pompáže je jeden z nebezpečných provozních (havarijních) stavů turbokompresoru. Stejně tak jako motor, tak i turbokompresor, musí mít nadřazené ochrany, které obsahují mj. i antipompážní ochranu. Ochrany kompresoru a řídicí systémy vyhodnocují stav pompáže z neelektrických veličin, jako je tlak na výtlaku a dodávané množství Q (hmotnostní tok m) a polohy regulačních ventilů v sání a výtlaku kompresoru a antipompážní regulace. Toto vyhodnocení vychází z naměřených charakteristik kompresoru, konkrétně z mezí stability [18]; [19].

V kapitole 3.1.4. dokazují, že je možno tento stav odvodit i z dynamického chování elektrického výkonu synchronního stroje, tzn. je možno jej vyhodnotit v budiči, kde tyto údaje jsou k dispozici. O principu vyhodnocení stavu pompáže z elektrických veličin v buzení synchronního stroje nebyly publikovány žádné články v odborných časopisech, ani v odborných periodikách [20]; [21]; [22]. V dostupné literatuře jsou uváděny postupy zjišťování stavu pompáže pouze z neelektrických veličin. Toto tvrzení podporuje i fakt, že o zmiňovaný princip projevil zájem renomovaná firma vyrábějící turbokompresory malých a středních výkonů.

Uvedenou problematiku jsem diskutoval s techniky a konstruktéry turbokompresorů, se kterými se pravidelně při zkouškách, opravách a revizích kompresorů a jejich pohonů. Dle jejich sdělení jim není znám způsob vyhodnocování stavu pompáže z elektrických veličin.

Proto tento způsob vyhodnocení havarijního mechanického stavu turbokompresoru považuji za vědecky nový a dosud nevyužívaný.⁴ Na princip vyhodnocení stavu pompáže z elektrických veličin jsem zahájil v 10/2017 patentové řízení, Toto řízení jsem v 02/2018 pozastavil a jedním s výrobcem turbokompresorů o přímém odkupu navrženého principu.

Jedná se tedy o nový přínos mé disertační práce.

⁴ V rámci výzkumu této disertační práce byl navrhovaný způsob vyhodnocování stavu pompáže aplikován a spolu s technikem závodu ČKD Kompresorů provozně vyzkoušen na turbokompresoru ETK 50 na dole Paskov, závod Staříč, v 03/2015. Správnost vědeckého odvození stavu pompáže z elektrických veličin, byla tímto provozně potvrzena.

Závěr

Ve výše uvedené kapitole 2.2.1.4. jsem se snažil doložit, že uvedené funkce nově navrženého budiče obsahují nová, doposud nepublikovaná řešení, která jsou novými přínosy mé disertační práce.

3. Teoretická analýza

3.1. Soustrojí turbokompresoru

Soustrojí turbokompresoru z pohledu mechatronického systému se skládá z pohonného motoru, převodovky (ta v některých případech, hlavně v současné době, bývá vypuštěna) a vlastního turbokompresoru. Dále to jsou ovládací a napájecí rozváděče, čidla, senzory, akční regulační členy a technologická vedení stlačeného a nasávaného média.

Nyní bych se zabýval jednotlivými komponenty systému.

3.1.1. Turbokompresory

[23] [19]

3.1.1.1. Rozdělení

Kompresory jsou pracovní stroje určené ke stlačování látek plynného skupenství. Kromě vzduchu jsou kompresory stlačeny i jiné plyny, kyslík, dusík a plynové směsi. Stlačeného média se využívá k vykonání určité práce (pohonu pracovních strojů připojených na rozvod stlačeného vzduchu) a současně také k překonávání třecích sil i ztrát v potrubních systémech či následných zařízeních, jako jsou třeba chemické technologie.

Podle způsobu stlačování média dělíme kompresory na objemové a rychlostní. U objemových kompresorů se dosahuje zvýšení tlaku zmenšováním prostoru, ve kterém je stlačovaný plyn uzavřen. Pohyb činné části může být přitom přímočarý (kompresory pístové, boxerkompresory, či kompresory membránové), nebo otáčivý – kompresory rotační (kompresory lamelové, dvourotorové, šroubové a další). U rychlostních kompresorů se dosahuje zvýšení tlaku přeměnou kinetické energie na tlakovou. Rychlostní kompresory se dělí na kompresory proudové a turbokompresory.

U turbokompresorů se dosahuje zvýšení tlaku plynu změnou hybnosti plynu při průtoku činnou, průtočnou částí stroje. Turbokompresory se dělí na odstředivé (radiální), nebo osové (axiální). U odstředivých kompresorů se využívá ke stlačování odstředivé síly a stlačovaný plyn převážně proudí v rovinách kolmých na osu rotace – v radiálním směru.

Zvláštním druhem (toto označení je použito v [19]) turbokompresorů jsou turbodmyhadla. Turbodmyhadla pracují však s nižším výstupním tlakem (0,2 – 0,3 MPa), při čemž stlačované médium není chlazené.

Hlavní nevýhoda turbokompresorů ve srovnání s pístovými kompresory vyplývá přímo z principu komprese v turbokompresoru. Stlačení, které lze dosáhnout v jednom stupni turbokompresoru, závisí značně na fyzikálních vlastnostech stlačeného média, především na jeho měrné hmotnosti. K dosažení vysoké komprese při stlačování lehkých plynů by bylo zapotřebí velkého počtu stupňů a se zřetelem na kritické otáčky by bylo nutné volit i několikatělesové provedení stroje.

Z principu stlačení vzduchu není u pístových kompresorů problém dosažení vysokých tlaků a srovnatelných množství, jako u turbokompresorů. Naproti tomu u turbokompresorů je problém zajistit malá dodávaná množství.

Velmi zjednodušeně lze říci, že pro vysoké tlaky a malá množství se používají kompresory pístové⁵, pro tlaky nízké (cca do 1 MPa) a velká množství se používají turbokompresory.

Na rozdíl od pístových kompresorů, turbokompresory jsou schopné dodávat velké množství plynu (5-150 tis m³.hod⁻¹) při relativně nízkém výstupním tlaku (cca 0,6 – 1 Mpa).

3.1.1.2. Použití turbokompresorů

Turbokompresory (radiální kompresory) jsou používány všude tam, kde je zapotřebí stlačovat střední a velká množství média na nízké a střední tlaky. V hornictví a ve velkých průmyslových závodech se používá odstředivých kompresorů pro výrobu tlakového vzduchu pro pneumatické stroje a nástroje, používaný tlak bývá 0,6 – 0,9 MPa a výkon 5 000 – 150 000 m³.hod⁻¹.

Také použití turbokompresorů v chemickém průmyslu je velmi široké. Jsou využívány jednak pro konečné stlačování plynných produktů a jednak jsou využívány v samotné technologii⁶.

V jaderných elektrárnách pracují turbokompresory při vysokém tlaku pro stlačování CO₂ při tlaku cca 6 MPa.

Turbokompresory velkých výkonů pracují také v kompresorových stanicích pro dálkovou přepravu zemního plynu. Koncern ČKD vybavoval tyto čerpací stanice turbokompresory, poháněné plynovými turbínami⁷, nebo synchronními motory s regulovanými otáčkami v rozsahu 2 200 - 3 600 ot.min⁻¹, o výkonu 25 MW⁸.

Turbokompresory jsou provozované při vysokých otáčkách; otáčky průmyslových kompresorů se pohybují řádově okolo 10 tis ot.min⁻¹. Většinou bývají kompresory spojeny se synchronními motory přes spojku s převodem cca 5 – 8x.

Pro přehled uvádím štítkové údaje soustrojí turbokompresoru, vyr ČKD Kompresory se synchronním motorem ČKD Elektrotechnika s bezkontaktním budičem typu RBL, který byl instalován v roce 1987 v Železárnách Podbrezová, ve Slovenské republice.

⁵ Na PZP Dolní Dunajovice se používají, pro vtláčení zemního plynu pod zem, boxerkompresory s mezním tlakem 12,2 MPa a dodávaným množstvím plynu 125 000 m³.h⁻¹, což je na pístový kompresor velké množství. Boxerkompresor je poháněn synchronním motorem o výkonu 4 MW s otáčkami 300 ot.min⁻¹.

⁶ Výroba kyslíku, kyseliny dusičné, výroba syntetického kaučuku, rafinace ropy, vysokotlaká chladicí zařízení a mnoho dalších.

⁷ Např. kompresorová stanice Hrušky u Břeclavi

⁸ V SR např. Velké Kapušany, Velké Zlievce a Jabložov n. T.

Turbokompresor typ 7 RMY 56 s převodovkou

nasávaný plyn	vzduch	
nasávané množství	m ³ .h ⁻¹	17 000
tlak na sacím hrdle	MPa	0,098
teplota na sacím hrdle	°C	20
tlak na výtlačném hrdle	MPa	0,8 – 0,88
teplota za dochlazovačem	°C	40
Potřebný výkon na spojce TK	kW	1 720
otáčky	min ⁻¹	10 240

Synchronní motor TK typ 38 228 04 HW1 s bezkontaktním budičem

jmenovitý výkon	kW	2 100
jmenovité napětí	V	6 000
otáčky	min ⁻¹	1 500
kmitočet	Hz	50
účinník		0,95
jmenovitý proud	A	222

Turbokompresory se rozbíhají s částečně (cca 90%) uzavřeným sáním a výtlakem a otevřenou antipompážní regulací, což je propojení mezi výtlakem a sáním (tzv. bypass). V této konfiguraci má kompresor nejnižší protimoment a nehrozí stav pompáže.

U turbokompresorů velkých výkonů jsou synchronní motory rozbíhány přes rozběhový reaktor, který je na konci rozběhu vykrácen. Doby rozběhu jsou u turbokompresorů vždy dlouhé, někdy přesahují dobu 60 s. Synchronizace (vtažení rotoru do synchronizmu) je však bezproblémová, většinou okamžik nabuzení je odvozen od času sepnutí hlavního vypínače motoru, nebo vykrácení rozběhové tlumivky.

Problematice rozběhu a synchronizace se věnuji v kapitole 3.2.5. této práce.

3.1.2. Vlastnosti turbokompresoru z pohledu elektropohonu

Dimenzování a návrh elektromotoru, který pohání turbokompresor, se provádí pro dva provozní stavy:

- ustálený chod
- rozběh

Z hlediska ustáleného chodu jsou, pro návrh elektromotoru, důležité otáčky a potřebný mechanický příkon turbokompresoru. Je nutné také uvažovat s výkonovou (momentovou) rezervou pro krátkodobé přechodové stavy, jako jsou změny zatížení, regulační výkyvy atp.

3.1.2.1. Volba pohonného motoru turbokompresoru

Při volbě, jaký typ motoru použít pro turbokompresor, je nutné rozhodovat se na základě následujících parametrů:

- výkon stroje
- mechanická časová konstanta
- moment M_s při jmenovitých otáčkách

Do výkonu turbokompresoru cca 500 kW se používají takřka výhradně asynchronní motory. Jejich výhodou je v lepším průběhu momentové charakteristiky, podstatně hladším a bezproblémovým rozběhem, jednoduchostí a v podstatně menších pořizovacích nákladech a nákladech na servis.

Asynchronní motor s klecovou kotvou nevyžaduje prakticky žádnou údržbu, má vyšší účinnost, než stroj synchronní a je méně cenově nákladný. Trvale však zatěžuje napájecí síť odběrem jalové energie, kterou je nutné na jiném místě napájecí soustavy kompenzovat.

Pro výkony nad 1 MW je výhodnější použití synchronních motorů. Zde je však nutné pečlivě porovnat momentové charakteristiky kompresoru a pohonného synchronního stroje. Při rozběhu stroje musí být vždy urychlující moment kladný. Je nutné zkontrolovat kritická místa rozběhové momentové charakteristiky, jako Görgesovo sedlo⁹ a moment zvratu.

Při momentovém dimenzování pohonného motoru je nutné uvažovat toleranci napájecí sítě motoru a pokles napětí motoru při rozběhu stroje. Rozběhový proud motoru, který bývá cca 3-6-ti násobek jmenovitého proudu (podle typu motoru a druhu rozběhu – přímé spuštění, nebo přes rozběhový reaktor) vyvolá úbytky napětí na impedancích napájecího transformátoru, vedení a dalších komponentech napájecí sítě. Tyto úbytky potom sníží statorové napětí stroje. Moment indukčních strojů (asynchronních i synchronních) kvadraticky klesá se svorkovým napětím stroje, proto vliv poklesu napětí na momentové poměry stroje je značný. Pokles napětí sítě při rozběhu stroje bývá 10 – 15%, podle stavu sítě daného podniku.

Synchronní stroje jsou provozně složitější, náročnější na údržbu a jsou investičně nákladnější. Velkým přínosem, oproti motorům asynchronním, je však možnost kompenzace jalové energie a to nejen vlastního stroje ale i nadřazené sítě, nebo v místě fakturačního měření

⁹ Görgesovo sedlo je pokles momentu na momentové charakteristice synchronního motoru. Je závislý na konstrukci stroje a impedanci sítě a vyskytuje se přibližně v 50% synchronních otáček stroje.

provozu. Velikost výkonu, který může být využit ke kompenzaci jalové energie a závisí na výkonové rezervě motoru a zatížení stroje. [4] O kompenzaci jalového výkonu synchronním strojem bude pojednáno v kapitole 3.2.2.3. a 4.1.

3.1.2.2. Převodovky

Vzhledem k principu odstředivého stlačení plynů potřebují turbokompresory ke své práci podstatně vyšší otáčky, než mají používané synchronní motory. Pro pohony turbokompresorů vyšších výkonů se používají převážně synchronní stroje s vyniklými póly s $2p=4$. Synchronní motory s $2p = 2$ a hladkým rotorem se používají pro pohon turbokompresorů pouze výjimečně (díky nepříznivým rozběhovým a momentovým poměrům). Pro pohon turbokompresorů se používají převodovky s převodovým poměrem 5 – 8, podle typu, výkonu a konstrukce kompresoru. Účinnost převodovek bývá 94 – 97%, také v závislosti na konstrukci a převodovém poměru.

Převodovka je umístěna mezi hnaným strojem a poháněcím elektromotorem a zajišťuje axiální držení rotoru pro pohonný stroj i turbokompresor. Dlouhá soustrojí (v případě soustrojí turbokompresorů se jedná o délku několika metrů, u velkých výkonů může překročit délku 10 m) mohou mít axiální držení (definovanou fixaci hřídele) pouze v jednom bodě – z důvodu tepelné dilatace rotoru. Je proto výhodné, aby tato fixace byla v prostředním bodě soustrojí a soustrojí mohlo dilatovat rovnoměrně na obě strany. To klade značné nároky na přesné vyrovnaní elektromotoru tak, aby se rotor po spojení s převodovkou nacházel v magnetické neutrále. Pokud tomu tak není, působí na rotor stálá síla v axiálním směru, která má za následek zhoršení mechanického chodu soustrojí (převážně v axiálním směru) a nadměrné namáhání axiálních dorazů v převodovce. Nastavení magnetické neutrály je velmi specializovaná činnost, kterou vykonávají odborně zdatní montéři výrobních závodů, nebo servisních firem.

Dimenzování rozběhu soustrojí turbokompresoru s elektromotorem je podstatně složitější. Zvláště v případě pohonu se synchronním motorem je nutno tomuto problému věnovat značnou pozornost, proto jej popíší v následujících kapitolách.

3.1.2.3. Rozběh soustrojí turbokompresoru

[15] U dimenzování elektropohonu vzhledem k rozběhovým parametrům soustrojí je nutno uvážit velikosti setrvačných hmot poháněného stroje, včetně převodu a závislost momentu na otáčkách během rozběhu, zejména pak velikost momentu při nulových otáčkách – tzv. „moment na utržení“¹⁰ stroje z klidu a velikost momentu na konci spouštění. Velikost setrvačných hmot se udává obvykle hodnotou GD^2 (momentu setrvačnosti J). Tento údaj je jen velmi těžko pro výpočet použitelný, protože nebývá často exaktně spočítán a pohybuje se ve velmi širokých mezích, lišících se od sebe v několika řádech (od několika $kg \cdot m^2$ do řádově tisíců $kg \cdot m^2$). Z tohoto důvodu byla stanovena velice názorná konstanta – mechanická časová konstanta T_m , (někdy se používá termínu „doba náběhu“), která udává poměr dvojnásobku kinetické energie roztočených hmot při jmenovitých otáčkách k jmenovitému výkonu. Tato

¹⁰ Zvýšený „moment na utržení“ je způsoben silami, které jsou zapotřebí na vytvoření olejového klínu u kluzných ložisek (moment tření v nosných radiálních ložiskách). Velká soustrojí jsou vybavena přídavným tlakovým mazáním, kde olejové čerpadlo natlačí olej pod čep ložiska a tím vytvoří olejový klín, potřebný pro roztočení a následnou samomaznou funkci kluzných ložisek. Po rozběhu soustrojí jsou tato čerpadla vypínána.

konstanta udává dobu, za kterou by se kompresor dostal z klidu na jmenovité otáčky, kdyby byl urychlován jmenovitým výkonem.

Mechanická časová konstanta je definována:

$$T_m = 2,74 \frac{GD^2}{P} \cdot \left(\frac{n_n}{1000}\right)$$

Kde:

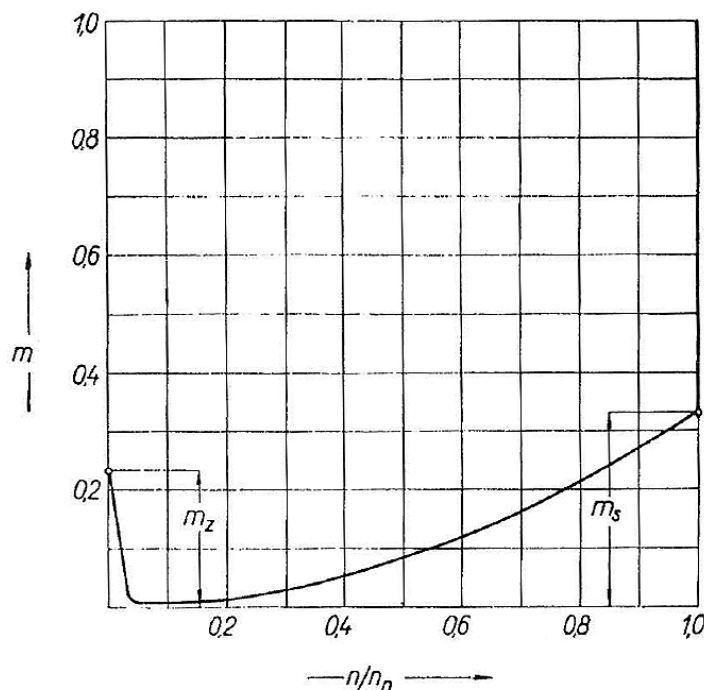
T_m je mechanická časová konstanta [s]

GD^2 (J) je moment setrvačnosti [kg.m²]

P je mechanický příkon kompresoru na hřídeli [W]

n_n jsou jmenovité otáčky [min]

Velikost T_m bývá obvykle 3 – 8 s pro vlastní turbokompresor a 5 – 10 s pro celé soustrojí. I zde dochází k velkému rozptylu hodnot - od 1 s, v některých případech může být i 20 – 50 s. Velmi vysoká konstanta T_m je například u několikastupňových kompresorů s velkým momentem setrvačnosti.



Na obrázku č. 6 [15] je názorná ukázka příkladu průběhu protimomentu turbokompresoru v závislosti na otáčkách. Na vodorovné ose jsou vyneseny poměrné otáčky, tj. poměr okamžitých otáček n k otáčkám jmenovitým n_n , na svislé ose je hodnota poměrného momentu. Hodnota okamžitého momentu k jmenovitému momentu M_n .

$$m_z = \frac{M_z}{M_n}$$

Kde m_z je poměrný záběrný moment při nulových otáčkách [-]

M_z je záběrný moment [Nm]

M_n je jmenovitý moment [Nm]

$$m_s = \frac{M_s}{M_n}$$

Kde m_s je poměrný moment při jmenovitých (synchronních) otáčkách [-]

M_s je moment při jmenovitých (synchronních) otáčkách [Nm]

M_n je jmenovitý moment [Nm]

Obrázek 6 - Průběh zátěžného protimomentu při spouštění turbokompresoru v závislosti na otáčkách

Na uvedeném průběhu je patrný vliv momentu „na utržení“ v počátku rozběhu; po vytvoření olejového klínu v kluzných ložiscích a překonání dalších statických momentů je vidět převládající kvadratická závislost momentu. [19]

Moment na utržení stroje z klidu se rovná momentu tření v radiálních ložiscích kluzného typu. Při výpočtu se uvažuje, že součinitel tření se rovná hodnotě 0,2. U dvouložiskového kompresoru bez převodovky je možno použít vzorec:

$$M_z = G \cdot d$$

Kde:

G je hmotnost rotoru [kg]

d je průměr ložiskového čepu [m]

Moment na konci spouštění při jmenovitých (synchronních) otáčkách M_s je dán hodnotou jmenovitého momentu a poměrem tlaku ve výtlaku a sání kompresoru ε . Při spouštění je regulační klapka na sání přivřena a kompresor pracuje jako exhaustor s konečným tlakem téměř shodným, jaký je před regulační klapkou. Příkon kompresoru a tím i moment M_s se zmenší proti jmenovitému momentu M_n na hodnotu:

$$M_s = \frac{M_n}{\varepsilon}$$

Turbokompresory s vysokým výstupním tlakem je možno pro rozběh takto momentově odlehčit, u turbodmychadel a kompresorů s nízkým provozním tlakem takovéto odlehčení nemá velký vliv.

U startu soustrojí je nutné zajistit maximální odlehčení pracovního stroje. Je nutné proto uzavření regulační klapky kontrolovat startovací logikou a nepovolit start, pokud není klapka uzavřena. V opačném případě je pravděpodobný neúspěšný start vlivem nedostatečného urychlujícího momentu pohonného motoru.

3.1.3. Fáze provozu soustrojí turbokompresoru

Provoz soustrojí turbokompresoru je možno rozdělit do několika fází:

1. fáze přípravy ke spuštění,
2. fáze rozběhu soustrojí,
3. fáze zatěžování,
4. fáze ustáleného chodu,
5. fáze odstavení kompresoru.

V následujících odstavcích jednotlivé fáze popíší a to z hlediska funkce a časové souslednosti. Do řízení těchto, na sebe navazujících fází, může značným způsobem zasáhnout řízení budiče a jeho mechatronické funkce.

3.1.3.1. Fáze přípravy ke spuštění

V této fázi je nutné provést spuštění pomocných pohonů a je nutné zahájit přípravné operace kontrolní funkce potřebné ke spuštění soustrojí.

Spuštění pomocných pohonů:

- spuštěním olejového čerpadla se zajistí průtok oleje pro mazání ložisek a převodovky. Je nutné kontrolovat teplotu oleje (pokud je nízká je nutné sepnout ohřev oleje), tlak oleje a jeho průtok. Kontrola průtoku je velmi důležitá, samotný tlak oleje nedává jistotu spolehlivého mazání ložisek (v případě ucpaného potrubí bude tlak v pořádku, ale do ložisek nepoteče potřebné množství oleje). Průtok se hlídá většinou komparačními průtokoměry,
- spuštěním čerpadel chladicí vody – ta je využita pro mezichladiče kompresoru, chladiče oleje (tam je chladicí voda vpuštěna až po najetí soustrojí, aby olejová náplň nebyla chlazená před spuštěním) a v některých případech i pro synchronní motory, pokud mají vodní chlazení. To bývá u motorů uzavřené konstrukce, které jsou určeny převážně do prostorů s nebezpečím výbuchu,
- spuštění ventilátorů chlazení, jsou někdy využívány pro nucené chlazení strojů, nebo pro vytvoření přetlakového uzávěru pro motory do nebezpečných prostorů v konstrukci se stálým vnitřním přetlakem.

Kontrolní a řídicí funkce:

- nastavení napájecí cesty pro elektromotor – kontrola připravenosti vypínačů (pracovní poloha, zapnuté ovládání, vřazený rozběhový reaktor - pokud je využíván),
- kontrola teplot motoru, kompresoru, oleje a chladicí vody,
- nastavení polohy klapky kompresoru na sání, výtlaku a bypassu (přepouštěcí klapky antipompážní regulace) – podrobný popis procesu najíždění kompresoru bude popsán dále).

3.1.3.2. *Fáze rozběhu soustrojí*

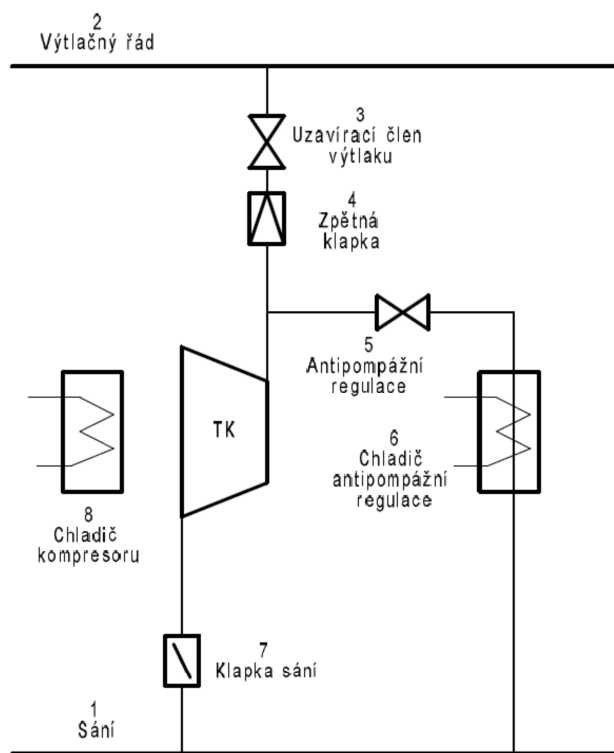
Rozběh z hlediska elektromotoru:

Turbokompresory středních a větších výkonů se rozbíhají přes rozběhový reaktor, který je vřazen buď mezi vypínač a motor, nebo do uzlu motoru. Obě zapojení jsou funkčně shodná, volí se pouze s ohledem na prostorové uspořádání a omezení rozsahu silové kabeláže. Při průchodu rozběhového proudu se na impedanci rozběhového reaktoru vytvoří úbytek napětí, který sníží napětí na motoru a tím i rozběhový proud. Bohužel, s napětím se s kvadrátem napětí sníží i moment stroje. Rozběhový reaktor se používá pro snížení rozběhového proudu, ale také z důvodu redukce velikosti urychlujícího momentu, který nebezpečným způsobem působí na některé komponenty soustrojí, např. spojky, ozubení převodovky, lopatky kompresoru a další. Při přiblížení se synchronním otáčkám poklesne statorový proud a dojde k vykrácení rozběhového reaktoru. Po doznění přechodného děje, který je způsoben zvýšením napětí na svorkách motoru vlivem vykrácení reaktoru, dojde k řízenému nabuzení a následné synchronizaci rotorového a statorového točivého pole. Po úspěšném nabuzení je rozběh z hlediska elektromotoru ukončen a může započít zatěžování kompresoru na jmenovité, nebo provozní parametry.

Rozběh z hlediska turbokompresoru: [19]

Obr. č. 7. Spouštění turbokompresoru je nutné provádět s přivřenou klapkou sání 1 a s otevřeným přepouštěcím ventilem¹¹ 5. Je to ze dvou důvodů:

- V tomto režimu je kompresor nejvíce odlehčený, tzn., roztáčí se s nejmenším možným protimomentem
- Otevřením přepouštěcího ventilu se zamezí přechod do režimu pumpáže, který je pro kompresor nebezpečný a který by mohl zavinit poškození lopatek kompresoru



Obrázek 7 - Blokové schéma regulačního okruhu turbokompresoru

by možno dosáhnout tlaku ve výtlačném potrubí a nebylo by možno otevřít zpětnou klapku a kompresor zatížit do řádu. Jedinou možností by bylo snížit tlak ve výtlačném řádu až pod tlak na výtlačky kompresoru. Při spouštění zůstávají uzavírací armatura 3 a zpětná klapka 4 uzavřeny a plyn proudí z výtlačky turbokompresoru otevřeným přepouštěcím ventilem 5 do sání. Škrtková klapka v sání 7 je přivřena tak, že kompresor pracuje s výstupním tlakem prakticky shodným s tlakem v sání (sání a výtlačky je spojen přes přepouštěcí ventil 5). Konečný tlak je nepatrně vyšší než tlak v sání pouze o odpor spouštěcího okruhu. Příkon turbokompresoru na konci rozběhu, tj. při dosažení jmenovitých otáček, je nejmenší možný pro tento způsob rozběhu. U vzduchových kompresorů není zapotřebí použít chladič 6, je možno vzduch vypouštět do atmosféry přes přepouštěcí klapku 5 (která slouží také jako antipompážní regulace).

Na obrázku č. 7 je znázorněno blokové schéma regulačního okruhu plynového turbokompresoru.

Turbokompresor TK nasává plyn ze sacího potrubí 1 a vytlačuje jej do výtlačného potrubí 2. Na společné sací 1 a výtlačné potrubí 2 je zapojeno většinou více zdrojů stlačeného plynu, takže v tomto potrubí je stále sací a výtlačný tlak. Turbokompresor, který je mimo provoz je automaticky odpojen uzavíracím členem 3 a zpětnou klapkou 4. Regulační okruh se skládá z přepouštěcího ventilu antipompážní regulace 5, z chladiče 6 a příslušného propojovacího potrubí. Chladič ochlazuje stlačené médium, aby nezvyšovalo teplotu na sání a tím negativně ovlivnilo stlačení média a snížilo účinnost. Kdyby tlak na výtlačky klesl zvýšením teploty na sání, nebylo

¹¹ Ventil č. 5 je umístěn v přepouštěcím okruhu kompresoru, který spojuje sání s výtlačkem. Tento okruh je nazýván také okruh antipompážní regulace (antipompáž), nebo také bypass. V mé práci používám, podle druhu funkce, všechny tři pojmy

3.1.3.3. Fáze zatěžování

Po rozběhu soustrojí a úspěšné synchronizaci elektromotoru nastává fáze tlakového stroje na provozní parametry a zapojení turbokompresoru na tlakovou síť, nebo do technologického procesu. Před zatěžováním je nutno nechat stroj pracovat při provozních otáčkách v nezatíženém stavu, aby se ustálily teploty jednotlivých jeho částí a aby nedošlo k mechanickému poškození vlivem nerovnoměrných tepelných dilatací jeho částí. Doba prohřevu stroje závisí na jeho velikosti, na konstrukci stroje, provozních teplotách a na dalších technologických podmínkách. Tento chod trvá několik jednotek až desítek minut.

Turbokompresor se zatěžuje tak, že se pomalu otevírá škrtkící klapka v sání 7 a zároveň se uzavírá klapka antipompážní regulace 5 tak, aby se na výtlaku zvyšoval tlak až na hodnotu tlaku ve výtlačném potrubí. Poté je možné otevřít klapku na výtlaku 3, a pokud je tlak na výtlaku kompresoru vyšší, než v řádu, začne se otevírat zpětná klapka 4. Kompresor poté můžeme zatěžovat uzavřením antipompážní klapky 5 a výstupní tlak, resp. množství regulovat armaturou na sání 7.

Při zatěžování musí být funkční antipompážní regulace, která hlídá, aby dodávané množství bylo vždy nad hodnotou antipompáže.

V antipompážní regulaci a v automatické najíždění hraje velkou roli sledování mechanického příkonu kompresoru, který je úměrný (po odečtení ztrát a účinností jednotlivých mechanických a elektrických komponentů) příkonu synchronního motoru, pohánějící kompresor. Ve stávajících systémech automatika kompresoru sleduje elektrické parametry svými čidly (separátní měřící transformátory proudu a napětí a převodníky výkonu), výkon vyhodnocuje a používá v regulaci. Tuto funkci může, v novém mechatronickém modelu, převzít budič, ve kterém jsou k dispozici signály všech výkonů (P; Q; S) a tyto signály může přenášet po digitální sběrnici do regulace kompresoru. Separátně může vyhodnocovat z průběhů veličin motorů pompáž kompresoru a tento stav vyhodnocovat jako poruchu a dávat signál regulačnímu systému kompresoru pro zahájení regulačního zásahu (otevření antipompážní klapky). V případě, že by nedošlo k úspěšnému odstranění stavu pompáže, po nastaveném čase odstavit soustrojí.

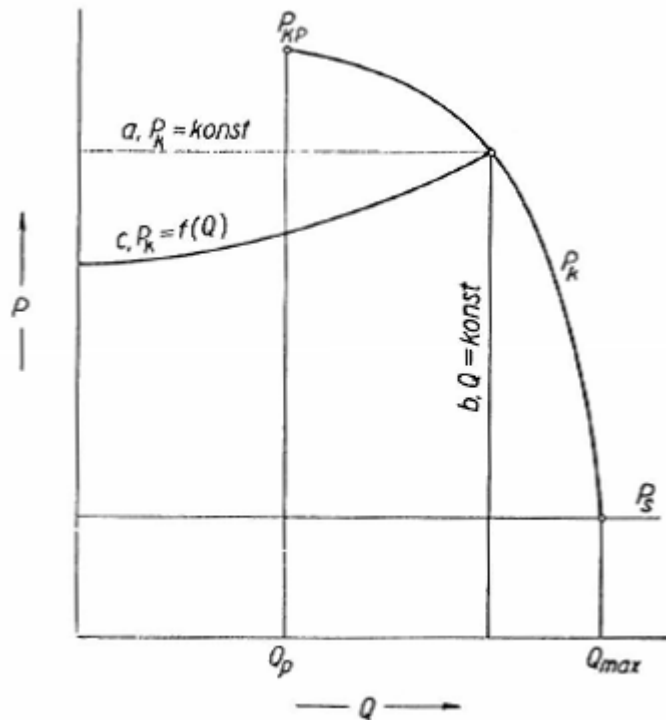
Toto je jedna z mnoha možných (avšak velmi důležitých, ne-li zásadních) funkcí, ve které může budič, jako převodník elektrických hodnot a jako technologický regulátor spolupracovat při regulaci tlaku.

Další účinnou funkcí je sledování přetížení motoru. V případě přetížení pohonného motoru, tzn., když proud synchronního motoru překročí jmenovitý proud (jeho zdánlivou složku – ta způsobuje oteplení motoru), může budič zahájit odbuzení, až na $\cos\varphi = 1$, kdy zdánlivá složka proudu je rovna činné složce. Pokud i v tomto případě je synchronní motor přetěžován, budič dává regulaci kompresoru signál k odlehčení. Pokud ani potom nedojde k poklesu přetížení pod stanovenou mez, budič hlásí výstrahu a pohon bude pravděpodobně odstaven nadřazenými nadproudovými ochranami, kde je nastaven odpovídající tepelný model stroje.

3.1.3.4. Fáze ustáleného chodu - provoz

Regulace turbokompresoru [19]

Na obr. č. 8 je znázorněna typická regulační charakteristika turbokompresoru. Kompresor nasává medium při konstantním sacím tlaku P_s a stlačuje jí na konečný tlak P_k . Závislost mezi nasávaným množstvím Q a konečným tlakem je znázorněna křivkou P_k . Při maximálním nasávaném množství Q_{max} odpovídá konečný tlak sacímu tlaku, $P_k = P_s$. Zvětšuje-li se odpor



sítě – zvyšuje se tlak ve výtlaku a zmenšuje se nasávané množství podle křivky P_k až po hodnotu odpovídající P_{kp} , kdy dochází k pompáži. Mez pompáže odpovídá zpravidla maximálnímu tlaku, obecně však s tímto maximem shodná být nemusí. Další zmenšování nasávaného množství (uzavírání klapky na sání turbokompresoru) pod hodnotu Q_p odpovídající tlaku P_{kp} má za následek provoz kompresoru ve stavu pompáže, což je provozně nebezpečný režim. Při pompáži dochází k výkonovým, tlakovým a mechanickým rázům, které mohou mít za následek nevratné poškození

Obrázek 8 - Regulační charakteristika turbokompresoru (19) kompresoru.

Regulační charakteristikou je jednoznačně určena závislost mezi nasávaným množstvím média (vzdušiny) a konečným tlakem v takzvané „stabilní“ oblasti charakteristiky, tj. v rozmezí nasávaného množství od Q_p do Q_{max} a také jednoznačně určena mez pompáže, pod kterou nesmí nasávané množství klesnout. Z výše uvedeného je patrné, že charakteristika $P = f(Q)$, (obr. č. 8) nevyhovuje potřebám provozu a regulace kompresoru v celém potřebném rozsahu. Proto je nutné měnit charakteristiku během provozu regulačním zásahem tak, aby odpovídala okamžitým potřebám technologického okruhu, do kterého je kompresor zařazen. To je možné, v případě elektrického pohonu přímo připojenému k síti (tzn., není možné měnit otáčky) v podstatě pouze změnami v průtočné části stroje, nebo pomocí akčního (regulačního) členu. Ten je umístěn v sání, nebo ve výtlaku (pro aktivní regulaci se používá regulační ventil v sání).

Regulace v průtočné části stroje se provádí nejčastěji natáčením lopatek v sání, a (nebo) natáčením difuzorových lopatek.

Zpravidla provoz kompresoru vyžaduje, aby rozsah regulace výstupního množství byl v rozmezí od nulového množství po množství jmenovité. Turbokompresor však není schopen

pracovat v rozmezí 0 - Q_p , což je oblast pompáže, proto je nutné pro dodávaná množství v tomto rozsahu využít antipompážní regulaci, tj. přepouštěcí okruh mezi výtlačkem a sáním.

Systémy turbokompresorů pracují zpravidla ve dvou režimech, režim na konstantní dodávku, tzn. konstantní množství (např. vysokopecní dmychadla) a na konstantní výstupní tlak (častější případ – rozvody stlačeného vzduchu pro pracovní stroje). Při dlouhých rozvodech stlačeného média bývá tlak regulován na základě dodávaného množství, pro kompenzaci tlakových ztrát v dlouhém potrubí.

Změna charakteristiky pomocí regulačního akčního členu [19]

Budu se nyní věnovat tomuto způsobu regulace, protože je nejvíce využíván u radiálních kompresorů, které jsou poháněny elektromotory s pevnými otáčkami (přímo připojenými k napájecí síti). Jak jsem již zmínil výše, turbokompresor se obvykle reguluje pomocí regulační klapky v sání turbokompresoru. Podstata tohoto způsobu regulace spočívá v tom, že se pomocí regulační klapky sníží tlak média sání a tím se dosáhne i požadovaného snížení výtlačného tlaku. Tlak v sání před regulačním ventilem zůstává nezměněn. Na obr. č. 9 je znázorněna charakteristika turbokompresoru, který je řízen škrcením v sání. Plnými čarami jsou vyznačeny charakteristiky výtlačného tlaku P_k a mechanického příkonu N při konstantním tlaku v sání P_s v závislosti na nasávaném množství Q (nasávané množství Q v $m^3 \cdot h^{-1}$ je hodinové množství stlačovaného média odebírané ze sacího potrubí). Nasávanému množství Q_1 odpovídá výtlačný tlak P_{k1} a mechanický příkon N_1 při tlaku v sání P_{s1} . Snížíme-li škrcením tlak v sání např. na hodnotu P_{s2} , sníží se měrná hmotnost nasávaného plynu v poměru P_{s2}/P_{s1} . Předpokládáme, že objem média protékajícím sacím hrdlem turbokompresoru zůstane stejný, jako před snížením sacího tlaku, potom se sníží množství nasávané za sacího potrubí Q_2 v poměru měrných hmotností:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{P_{s2}}{P_{s1}}$$

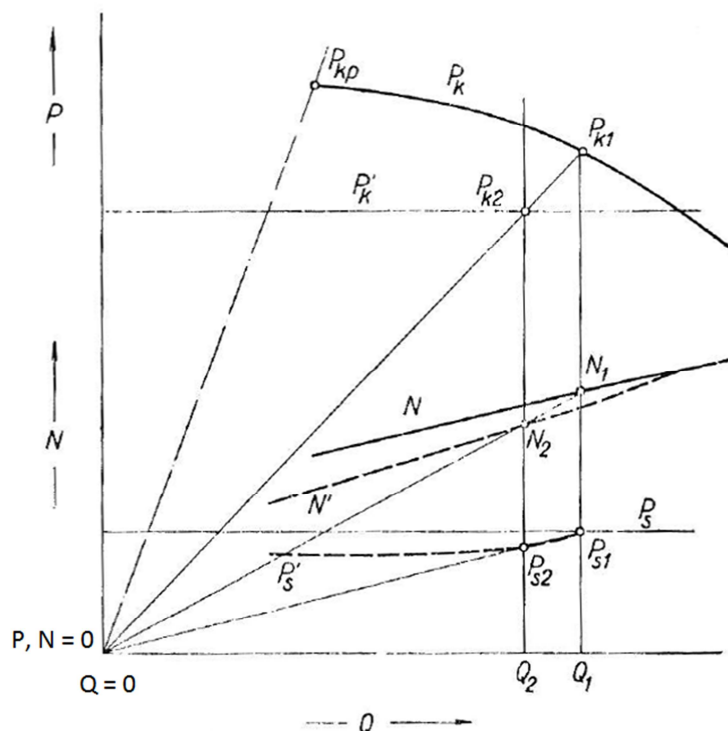
Při stejném objemu nasávaného plynu budou rychlostní trojúhelníky na vstupu i výstupu turbokompresoru stejné a proto se také dosáhne stejného stlačení ε a výtlačný tlak P_{k2} bude dán úměrou:

$$\varepsilon = \frac{P_{k1}}{P_{s1}} = \frac{P_{k2}}{P_{s2}}; \quad \frac{P_{k2}}{P_{k1}} = \frac{P_{s2}}{P_{s1}}$$

Při shodných rychlostních trojúhelnících a stejném stlačení ε se nezmění ani účinnost komprese a příkon se sníží v poměru měrných hmotností, tj. v poměru tlaků:

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{Q_2}{Q_1} = \frac{P_{s2}}{P_{s1}}$$

Uvedené úměry umožňují vyhodnocení charakteristik, které jsou znázorněny na obr. č. 9. Body na charakteristice P_{k1} , N_1 , a P_{s1} , spojíme s počátkem souřadnic, bodem $Q; P = 0$. Na průsečíku těchto spojnic se svislicí pro určité nasávané množství Q_2 leží odpovídající body P_{k2} , N_2 a P_{s2} pro jiný tlak v sání. Graficky, nebo početně lineárním přepočtem je možno tímto způsobem stanovit celý průběh charakteristik N' a P_s' při stálém výtlačném tlaku $P_k' = \text{konst.}$, známe-li průběhy N , $P_k = f(Q)$ při konstantním tlaku v sání.



Obrázek 9 - Regulace turbokompresoru škrcením v sání (19)

Uvedený způsob přepočtu uvažuje úměrné snižování ztrát mechanických, ucpávkových, ventilačních (a dalších) a předpokládá konstantní hodnota Reynoldsova čísla R^{12} . Z uvedeného vyplývá, že toto znázornění je zatížené, pro praktické účely zanedbatelnou, chybou.

Z uvedeného rozboru jasně vyplývá, že každému pracovnímu bodu na charakteristice odpovídá definovaný bod mechanického příkonu turbokompresoru. Tento bod je možno, se zanedbáním ztrát elektromotoru, srovnat s hodnotou činného příkonu elektropohonu, naměřeného z elektrických veličin elektromotoru.

Z obr. č. 9 je dále patrné, že při regulaci škrcením v sání není možno provozovat kompresor pod oblast omezenou přerušovanou čarou, spojující bod P_{kp} a počátek souřadnic. Jedná se o oblast pompáže v které je provoz kompresoru nepřípustný a může mít za následek nevratné poškození částí kompresoru. Stavů „pompáže“ se budu zabývat v kapitole 3.1.4.

V některých případech - jedná se např. o přechodné stavy, kdy kompresor napájí tlakovou síť, na které jsou napojeny pracovní stroje - dojde k potřebě snížit množství dodávaného vzduchu pod hranici pompáže, nebo jej (množství) omezit prakticky na nulu. To může nastat v případě zastavení pracovních strojů při střídání směn, nebo při přerušení práce na krátkou, definovanou dobu, kdy se nevyplatí turbokompresor odstavovat. V tomto okamžiku je možno provozovat kompresor v nestabilní oblasti odběrové charakteristiky s využitím antipompážní regulace, tj. regulace přepouštění. V tomto případě se část množství stlačovaného média vrací zpět z výtlaku do sání kompresoru, v případě vzduchových turbokompresorů, s výfukem do atmosféry. Tento způsob regulace je, z hlediska účinnosti, neefektivní a není vhodné jej provozovat dlouhou dobu. K provozu turbokompresoru, s aktivovanou antipompážní regulací, docházelo u strojů pracujících v OKD, kdy byla značným způsobem omezována a následně ukončována těžba. Díky velmi nízké účinnosti tohoto provozu bylo ekonomicky výhodnější pořídit nové kompresory s menším výkonem (s pracovní charakteristikou umožňující dodávat menší množství vzduchu) a provozovat je s kaskádní regulací v paralelním chodu.

¹² **Reynoldsovo číslo R** je bezrozměrná veličina, která dává do souvislosti setrvačné síly a viskozitu (tedy odpor prostředí v důsledku vnitřního tření). Pomocí něj je možné určit, zda je proudění tekutiny laminární, nebo turbulentní. Čím je Reynoldsovo číslo vyšší, tím nižší je vliv třecích sil částic tekutiny na celkový odpor. Je dáno poměrem měrné hustoty kapaliny, její rychlosti a průměru trubice k viskozitě kapaliny.

Antipompážní regulace (také nazývaná „bypass“, čili „obtok“) se provozně také využívá při startu a odstavování kompresoru. Těmito postupy se zabývám v kapitole 3.1.3.2. a 3.1.3.5.

Převážná většina turbokompresorů, je vybavena automatickou regulací výkonu, automatickou antipompážní regulací a havarijní logikou, která kontroluje důležité provozní hodnoty soustrojí. Regulační bloky si vyhodnocují všechny parametry a potřebné veličiny ze svých čidel a převodníků, čímž dochází k mnoha duplicitám. Tyto duplicity jsou nebezpečné, protože vlivem chyby měření, snímání z jiných míst a jiných čidel, než má elektrický pohon, dochází k rozdílům. Někdy se tyto hodnoty mohou lišit řádově o procenta i desítky procent. Z tohoto důvodu je vhodné při měření a regulaci vycházet z jednoho zdroje a to může být budič, ve kterém jsou všechny potřebné elektrické signály k dispozici. Budič může předávat tyto informace jednak technologickému regulátoru kompresoru, jednak do velínu k obsluze. Pokud budou elektrické hodnoty vyhodnocovány na jednom místě, nebude docházet k duplicitám a nebezpečným rozdílům. Prověřená zásada zní: každá veličina by se měla měřit pouze jednou (pokud není z bezpečnostních důvodů požadováno duplicitní měření se vzájemnou verifikací – jako je to např. u měření rychlosti u těžních strojů).

Ve fázi ustáleného chodu pracuje, jak již bylo zmíněno výše, automatická regulace výkonu turbokompresoru, většinou v režimu konstantního tlaku ve výtlačném řádu. Pokud do řádu pracuje více kompresorů, musí jeden kompresor regulovat na konstantní tlak v řádu, ostatní na konstantní dodávané množství. Pokud neexistuje datová komunikace mezi řízením všech kompresorů, která zajistí rozdělení výkonů, nemůže na nadřazenou veličinu regulovat více, jak jeden kompresor. Logicky by docházelo k „přetahování“ výkonů jednotlivých kompresorů a společná regulace by byla nestabilní.

Vzhledem k tomu, že odběry stlačeného vzduchu ze sítě mohou být v čase velmi rozdílné (odběr vzdušniny do pracovních strojů není konstantní), mění se i činný výkon synchronního stroje. To klade, v dnešní době, kdy jsou velmi přísné odběrové podmínky energetických providerů na dodávku, nebo odběr jalové energie, velké nároky na přesnost regulace jalové energie synchronního motoru, který zajišťuje budící souprava. Ta má, pro ustálený provoz, k dispozici několik regulačních režimů, které je možné využít s ohledem na energetické potřeby provozovatele.

Základní je režim regulace na konstantní $\cos \varphi$ motoru, což znamená, že budič reguluje budící proud synchronního motoru tak, aby tento vždy pracoval při konstantním účinníku na svorkách stroje. Při zatěžování automaticky přibuzuje, při odlehčování odbuzuje, a to v rámci svých nastavených limit. Tento režim je velmi často používaný a pro obsluhu znamená, že se o budič a budící parametry nemusí starat, budič zajistí energeticky výhodný chod. Pracovní účinník většinou stanovuje energetik provozovatele. Samozřejmě nejvýhodnější účinník pro provozu synchronního motoru je $\cos \varphi = 1$. Při tomto účinníku protéká statoru motoru nejnižší proud (pouze činná složka), také rotorový proud je nejnižší možný vzhledem k danému zatížení. Dochází k nejmenšímu možnému oteplení a tepelným ztrátám.

Další možný režim pro provoz v ustáleném režimu, kdy se mění výkon turbokompresoru v čase je provoz na konstantní dodávku jalové energie. Také tento režim určí energetik, který

potřebuje stálou dodávku jalové energie. Někdy si tento režim zvolí energetický provider, který si objedná kompenzaci své sítě.

Velmi oblíbeným režimem je kompenzace „na vzdálený účinník“. V tomto režimu je buzením regulována dodávka, či odběr jalové energie tak, aby v definovaném místě energetické soustavy (odkud je do budiče zavedena zpětná vazba skutečného účinníku) byl konstantní účinník. Většinou to bývá v předávacím místě, tzn. v místě fakturačního měření. Zde má odběratel povinnost dodržet účinník v mezích 0,95 ind – 1, v celoměsíčním průměru (pokud nemá s providerem sjednány podmínky jiné). Pokud tyto podmínky nedodrží, je provider oprávněn odběratele penalizovat. Položky penalizace za nedodržení účinníku nejsou zanedbatelné, proto tato regulace synchronního motoru, kdy je udržován odběrový účinník v daných mezích, je velmi výhodná.

Při tomto režimu se pohybuje budicí proud nezávisle na výkonovém zatížení kompresoru, ale sleduje změny účinníku nadřazené soustavy (jsou však ve funkci nastavené limity účinníku motoru, aby nedošlo k výpadku ze synchronizmu). Nutno podotknout, že regulace jalového výkonu je možná pouze v dostupných regulačních mezích budiče a výkonových mezí synchronního stroje. V tomto režimu pracuje synchronní motor jako automatický rotační kompenzátor. Pokud budič v regulaci dosáhne nastavených mezních limit, je tato skutečnost signalizována jako výstraha, aby obsluha měla informaci, že nemusí být dodrženy odběrové podmínky.

I ve fázi ustáleného chodu budič aktivně zasahuje do regulace kompresoru, nebo ji podporuje. V případě, že dojde k proudovému (výkonovému) přetížení kompresoru, budič nejdříve začne odbuzovat až k hodnotě $\cos\phi = 1$ (kdy je nejnižší satorový proud synchronního motoru¹³), pokud to nestačí, dává pokyn výkonové regulaci kompresoru k odlehčení. V případě, že ani to nevyřeší problém, dává výstrahu a pohon odstaví nadproudová ochrana motoru.

3.1.3.5. *Fáze odstavování turbokompresoru*

Turbokompresor se odstavuje opačným technologickým postupem, než se spouští. Stroj se odlehčí uzavíráním klapky ve výtlaku 3 (obr. č. 7) a otevíráním přepouštěcího ventilu 5 (antipompážní regulace). Tyto dvě operace je nutné provádět v součinnosti, aby se stroj nedostal do stavu pompáže. Zároveň se přivírá klapka na sání 3. Po odlehčení soustrojí je vhodné krátkou dobu nechat soustrojí v chodu naprázdno, opět pro vychlazení a vyrovnání teplot. Po nastavené době je poté stroj odpojen od napájecí sítě. Pomocné pohony zůstávají v chodu až do vychlazení pohonného motoru i kompresoru. Technologický automat hlídá pomocné pohony soustrojí a odepíná stroj od výkonové komparace po celkovém odlehčení soustrojí.

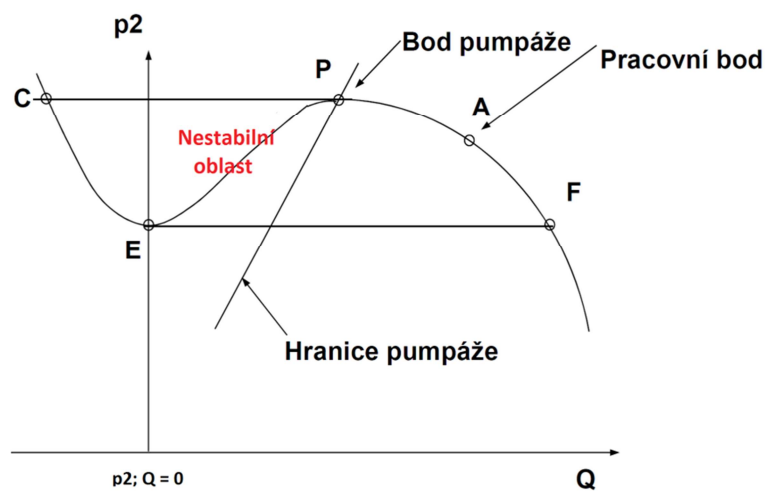
Proces chlazení je důležitý i pro samotný synchronní stroj. U strojů s dlouhými rotory může po odstavení dojít k průhybu hřídele, což má za následek vznik nevyvážení (tzv. debalance) a zhoršení mechanického chodu stroje. Tento stav nastával např. u synchronních strojů 25 MW pohánějící turbokompresory pro stlačování plynu v tranzitním plynovodu, které ČKD

¹³ Podle „V“ křivky synchronního motoru je nejnižší satorový proud při $\cos\phi = 1$. V induktivním a kapacitním režimu se proud opět zvyšuje. Hodnota satorového proudu se lineárně mění se zatížením (statorem teče pouze činný proud).

Elektrotechnika vyráběla v 80-tých letech minulého století. U některých pohonů, u nichž docházelo k průhybu rotorů po odstavení vlivem teploty, byl montován protáček mechanismus, který zajistil pomalé protáčení soustrojí, až do vychladnutí na teplotu okolí.

3.1.4. Stav pompáže turbokompresoru

[19] [23] Pompáž je neprovozní režim práce turbokompresoru, způsobený odtržením vzduchových proudnic od lopatek. Vyznačuje se tlakovými rázy a extrémním nárůstem teploty stlačovaného média v kompresoru. Tyto havarijní vlivy mohou v krátké chvíli způsobit totální havárii kompresoru. Při pompáži dochází k fluktuacím toku média v celém kompresním systému. Tyto fluktuace mohou být tak velké, že v určité části cyklu pompáže může tok dosahovat záporných hodnot (tlak působí z opačné strany lopatek). Oscilující



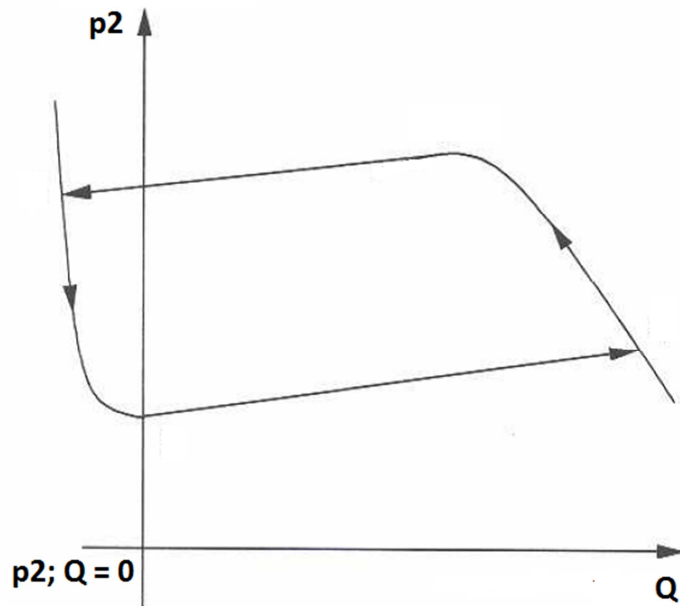
Obrázek 10 - Charakteristika přechodu do stavu pompáže

vysokými změnami tlaku a toku média. Tento tok se v určité části cyklu dostává i do záporných hodnot (!). Frekvence hluboké pompáže je dána plněním a vyprazdňováním objemu připojeného na výtlak kompresoru a je tedy závislá na konstrukci kompresoru a celého regulačního systému.

Na obr. č. 10 [24] je znázorněna statická závislost tlaku p_2 na výstupu kompresoru p_2 na dodávaném množství Q . Snižováním průtoku média kompresorem, ke kterému dochází např. při tlakové regulaci, kdy se zvyšuje odpor technologie ve výtlaku (zastavování pracovních strojů, atp.) se pracovní bod kompresoru „A“ posunuje po charakteristice $p = f(Q)$ směrem k nestabilní oblasti – bod „P“. V blízkosti nestabilní oblasti dochází k nestabilitě proudu stlačovaného média, která je nazývána „Rotující odtržení v prostoru turbokompresoru“¹⁴. Při pompáži se samovolně a cyklicky snižuje průtok a tlak a v případě hluboké pompáže se dodávané množství sníží na nulu – bod „E“ a dále se otáčí směr toku média (na obrázku bod „C“)

¹⁴ Tento nepříliš český termín vznikl překladem z anglického výrazu „Rotating stall in a centrifugal compressor“

Na obrázku č. 11 je uvedena dynamická závislost tlaku p_2 a dodávaného množství Q . Je patrné, že při hluboké pompáži dodávané množství Q opravdu může dosáhnout záporných hodnot. Pokud kompresor přejde do stavu hluboké pompáže, dodávané množství Q se prudce sníží a, v některých případech, změni i směr toku. Poté prudce klesne tlak na výtlaku p_2 a zvyšuje se dodávané množství Q . Tento cyklus se cyklicky opakuje, jak je patrné z obr. č. 11. Cyklus pompáže doprovází zvýšené vibrace, které jsou nebezpečné pro kluzná ložiska a další části kompresoru.



Obrázek 11 - Závislost tlaku a toku média při hluboké pompáži

generátorického režimu. Tento provozní režim pro synchronní motor není nebezpečný. Automatika regulace jalové energie (regulace na konstantní $\cos \varphi$) musí však umět s tímto stavem počítat a vyhodnotit správnou polaritu účinníku ve správném pracovním kvadrantu (čtyřkvadrantové vyhodnocování skutečné hodnoty účinníku)

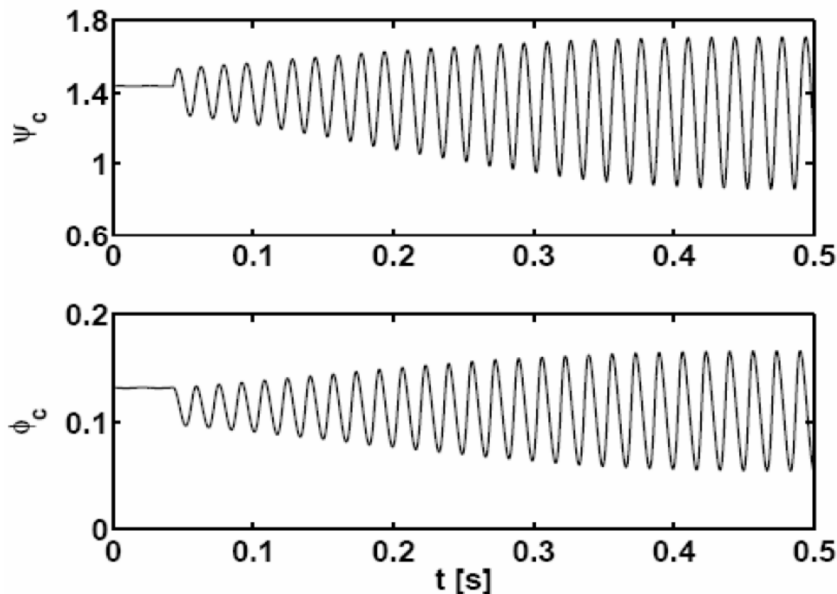
Kombinovaný režim (generátorický/motorický) není pro synchronní motor nestandardním stavem. Pravidelně k němu dochází např. u synchronních pohonů Ward-Leonardových soustrojí těžních motorů, kdy při jízdě s těžkým břemenem dolů se dostává DC řídicí dynamo do motorického režimu a pohonný synchronní motor DC řídicího dynama do režimu generátorického. I v tomto režimu, ze stejného důvodu změny polarity skutečné hodnoty $\cos \varphi$, je komplikovaná regulace na konstantní účinník.

Jak je patrné z obrázku č. 11, při režimu pompáže se mění jak tlak p_2 , tak množství Q v periodickém opakování, ve směru šipek. Jak bylo výše prokázáno v teoretickém rozboru chodu kompresoru, dodávané množství Q je funkcí výkonu synchronního motoru (mechanický výkon na jeho hřídeli), který je úměrný (po odečtení mechanických a elektrických ztrát elektromotoru, které se pohybují, při jmenovitém výkonu, okolo 5%) činnému příkonu, který je měřen v budiči. Tento mechanický výkon se při pompáži cyklicky mění a v některých případech přechází do záporných hodnot, což pro synchronní motor může znamenat krátkodobý přechod do

3.1.4.1. Cyklus pompáže

Vývoj cyklu pompáže při konstantní poloze ventilu na sání je ukázán na obr. č. 12 [24]. Po určitém čase je dosažen limitní cyklus pompáže, jehož frekvence a průběh závisí na konfiguraci kompresního systému. Cyklus pompáže začíná na hodnotě maximálního stlačení a v kompresní charakteristice se pohybuje proti směru hodinových ručiček.

V důsledku snížení hmotnostního toku ψ_c (množství Q), stlačení v kompresoru poklesne. Když stlačení poklesne na určitou hodnotu, kompresor je opět schopný tlak p_2 a hmotnostní tok ψ_c obnovit. Poté stlačení v kompresním systému vzrůstá na maximální hodnotu a cyklus se opakuje.



Obrázek 12 - Průběh koeficientu toku a stlačení v závislosti na čase

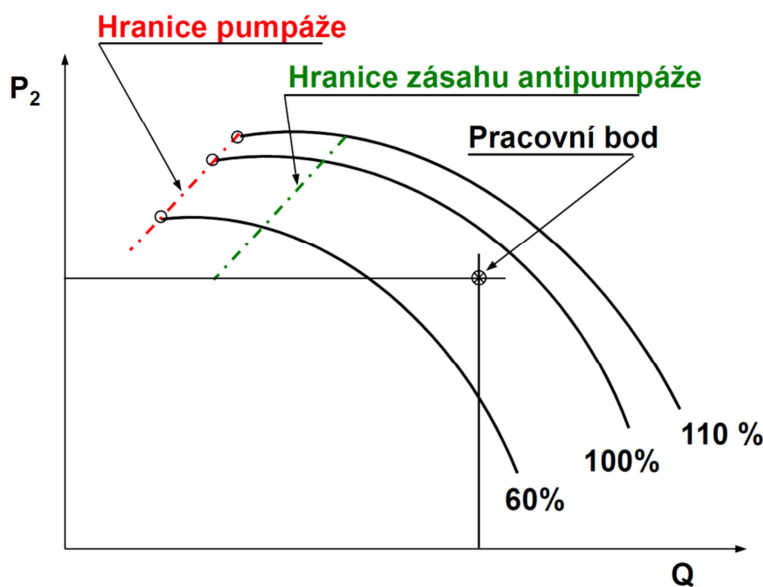
Na obr. č. 12 je znázorněn periodický ustálený průběh závislosti bezrozměrného stlačení ψ_c hmotnostního toku Φ_c na čase t . Uvedené průběhy odpovídají turbokompresoru malého výkonu, kde je délka periody pompáže cca 20 – 50 ms. U kompresorů větších výkonů (nad $20\,000\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$) je délka periody pompáže 0,1 – 1s.

Průběh bezrozměrného stlačení ψ_c hmotnostního toku Φ_c na obr. č. 12 jsou popsány rovnicemi 3.1.4-1 a 3.1.4-2 v následující kapitole 3.1.4.3.

3.1.4.2. Detekce a potlačení pompáže

[23] [19] Jak bylo popsáno výše, stav pompáže se projevuje cyklickými změnami výstupního tlaku, množství a tím i mechanického příkonu na hřídeli kompresoru. Frekvence změn výkonu, strmost změn výkonu (dP/dt) a jeho amplituda závisí na konstrukci stroje, otevření vstupních a výstupních armatur a armatury antipompážní regulace. Oblast stability a oblast přechodu do pompáže lze určit výpočtem a také bývá projektanty a výrobcem kompresoru definována. Ze zkušenosti však vím, že málokdy takto vypočítaná oblast stability odpovídá skutečnosti. Proto je nutné při uvádění do provozu turbokompresoru proměřit charakteristiku $\Delta p=f(Q)$ kompresoru a stanovit reálné meze stability. Na obrázku č. 13 uvádím tuto

charakteristiku spolu s vyznačením mezí stability. Z obrázku je patrné, že regulace výstupního tlaku uzavíráním klapky na sání (to vede k snižování dodávaného množství) může vést až k dosažení pumpovní meze. Tento stav je nutné vyhodnotit a provést regulační opatření (otevřít ventil antipumpážní regulace). V současné době je stav pumpáže vyhodnocován z neelektrických (tlak a množství na výtlaku a sání) a stavových (polohy regulačních klapek) veličin, které měří a vyhodnocuje ŘS turbokompresoru. Ty vycházejí ze skutečných charakteristik kompresoru, které jsou měřeny při komplexních zkouškách kompresoru, a poté programovány do ŘS TK. U axiálních turbokompresorů je stav pumpáže vyhodnocován z rychlého termistoru, který je umístěn v sacím hrdle kompresoru. Při zpětném toku média dojde k okamžitému zvýšení teploty na sání a čidlo teploty tento stav signalizuje do ŘS kompresoru, který tento impuls vyhodnotí jako pumpáž.



Obrázek 13 - Stanovení hranice pumpáže

dodávaným množstvím. Volba velikosti bezpečnostního pásma je proto kompromisem mezi požadovanou šířkou regulačního pásma a jistotou bezpečnosti provozu.

Jak již bylo popsáno výše, pumpážní stav se plně projeví v časovém průběhu činného výkonu synchronního motoru (odvozeno v kap. 3.1.4.3. Všechny potřebné elektrické veličiny jsou k dispozici v budiči, tzn. je možné stav pumpáže definovaně, bez přizpůsobení pohonu, vyhodnotit a provést regulační zásah, nebo minimálně signalizovat tento stav nadřazeným systémům. Z tohoto faktu vznikla vize stav pumpáže vyhodnocovat v budícím systému. Tato funkce bude popsána v kapitole č. 4.5.3.

Shrnutí:

- Pumpáž - nebezpečný jev, při kterém u turbokompresoru dochází vlivem odtrhávání proudu v průtočné části kompresoru k periodickým změnám jeho směru a v důsledku toho k pulsacím, které mohou poškodit stroj.
- Cílem antipumpážní regulace je zamezit tomu, aby pracovní bod kompresoru překročil hranici pumpáže a tím zajistit, aby kompresor pracoval pouze ve stabilní oblasti.

- Vzdálenost hranice zásahu antipompážní regulace od hranice pompáže se obvykle volí 10%, v literatuře je uváděna i hodnota 4%.

3.1.4.3. Matematické určení hranice pompáže

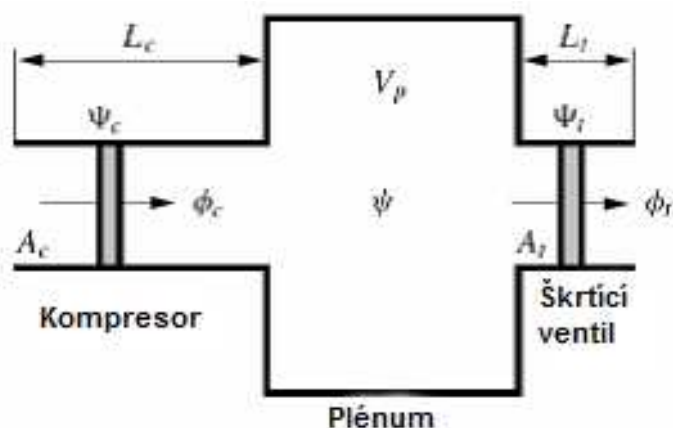
Základem matematického určení pompážních stavů a hranice pompáže je pochopení fyzikálních stavů v kompresním systému a vytvoření matematického modelu, který popisuje dynamiku důležitých jevů. Takových modelů bylo vytvořeno velké množství. Tyto modely jsou nyní využívány v řídicích systémech pro řízení regulace odstředivých kompresorů. Pro příklad uvedu nejčastěji používaný matematický model – Greitzerův model, který, mj., definuje závislost bezrozměrného hmotnostního toku kompresoru Φ_c a bezrozměrného stlačení Ψ_c . Tento model zanedbává, pro zjednodušení, řadu veličin, poskytuje však prakticky využitelné výsledky.

Greitzerův model [24]

Greitzerův model (principální obrázek výchozího uspořádání je na obr. č. 14) je založen na modelu Helmholtzova rezonátoru¹⁵.

Kompresní systém je zde nahrazený potrubím, ve kterém pracuje kompresor a které se rozšiřuje do velkého objemu V_p . Toto rozšíření (prostor) se často nazývá plénem. Stlačený plyn proudí skrze plénem a přes škrticí ventil do atmosféry.

Pro tento model platí několik předpokladů. Proudění plynu v potrubí je jednorozměrné. V plénu je tlak považován za rovnoměrný v celém objemu a rychlost plynu je zanedbatelná. Poměr teplot v systému je považován za rovný jedné, takže není potřeba energetická bilance. Vliv změn rychlosti rotoru na chování systému je zanedbatelný.



Obrázek 14 - Greitzerův model

bezrozměrný hmotnostní tok Φ a bezrozměrné stlačení Ψ .

Bezrozměrný hmotnostní tok Φ (průtokový součinitel)

$$\Phi = \frac{m}{\rho_a \cdot A_c \cdot U_t} \quad [-] \quad (3.1.4 - 1)$$

¹⁵ Teorie Helmholtzova rezonátoru popisuje rezonanční děje v uzavřené dutině. Používá se především při zkoumání a modelování akustických dějů.

kde:

m – hmotnostní tok [kg.s⁻¹]

ρ_a – hustota stlačovaného plynu [kg.m⁻³]

A_c – plocha průřezu potrubím kompresoru [m²]

U_t – obvodová rychlost [m.s⁻¹]

Bezrozměrné stlačení (tlakový součinitel)

$$\psi = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot U_t^2} [-] \quad (3.1.4 - 2)$$

kde:

Δp – tlaková diference [Pa]

Pro odvození bezrozměrových rovnic je nutné znát Helmholtzovu frekvenci:

$$\omega_H = a \cdot \sqrt{\frac{A_c}{L_c \cdot V_p}} [\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (3.1.4 - 3)$$

kde:

a – rychlost zvuku [m.s⁻¹]

V_p - objem pléna [m³]

L_c – ekvivalentní délka potrubí kompresoru [m]

Potom

$$t' = t \cdot \omega_H [-]$$

kde

t - čas [s]

Bezrozměrné rovnice popisující dynamické chování kompresoru jsou:

$$\frac{d\Phi_c}{dt} = B \cdot [\psi_c - \psi] \quad (3.1.4 - 4)$$

$$\frac{d\Phi_t}{dt} = \frac{B}{G} \cdot [\psi - \psi_c] \quad (3.1.4 - 5)$$

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{1}{B} \cdot [\Phi_c - \Phi_t] \quad (3.1.4 - 6)$$

$$\frac{d\psi_c}{dt'} = \frac{1}{\tau'} \cdot [\psi_{c,ss} - \psi_c] \quad (3.1.4 - 7)$$

Φ_c - bezrozměrný hmotnostní tok kompresoru [-]

ψ - bezrozměrné stlačení v plénu [-]

$\psi_{c,ss}$ - bezrozměrné stlačení při ustáleném stavu [-]

Ψ_c - bezrozměrné stlačení kompresoru [-]

Ψ_t - bezrozměrný pokles tlaku na škrticím ventilu [-]

Φ_t - bezrozměrný hmotnostní tok na škrticím ventilu [-]

Rovnice (3.1.4-4) a (3.1.4-6) jsou jednorozměrné rovnice hybnosti pro potrubí kompresoru a škrticího ventilu. Rovnice (3.1.4-6) vyjadřuje zachování hmotnosti v plénu. Dynamické chování kompresoru je popsáno rovnicí (3.1.4-7). Popis toku v Greitzerově modelu je pouze jednorozměrný, takže může být popsána pouze změna hmotnostního toku Φ_c a stlačení ψ . Řešením bezrozměrných rovnic dostaneme tři parametry systému.

Greitzerův parametr stability

$$B = \frac{U_t}{2 \cdot \omega_H \cdot L_c} [-]$$

Tento parametr je kvantitativní mírou predikce počátku nestability kompresního systému. Systémy s hodnotou parametru B nad hodnotou kritickou B_{krit} podléhají pompáži, zatímco s malou hodnotou B mají tendenci k rotujícímu odtržení proudu (rotující odtržení proudu je další typ nestability).

Parametr

$$G = \frac{L_t \cdot A_c}{L_c \cdot A_t} [-]$$

kde

L_t - ekvivalentní délka potrubí škrticího ventilu [m]

L_c - ekvivalentní délka potrubí kompresoru [m]

A_c - plocha průřezu potrubí kompresoru [m²]

A_t - plocha průřezu potrubí škrticího ventilu [m²]

Tento parametr interpretuje míru významu setrvačných účinků v potrubí škrticího ventilu ve srovnání s těmi v potrubí kompresoru.

Časová konstanta

$$\tau' = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_t \cdot N_\tau}{U_t} \cdot \omega_H [s^{-1}]$$

kde

R_t - poloměr oběžného kola [m]

N_τ - zpoždění v asociaci s formováním buněk rotujícího odtržení proudu [s^{-1}]

U_t - obvodová rychlost [$m \cdot s^{-1}$]

Časová konstanta vyjadřuje čas potřebný k plnému rozvoji rotujícího odtržení proudu po iniciaci. Tato konstanta je odlišná od předchozích parametrů B a G, protože závisí na odezvě systému a nemůže být nastavena předem. [24]

Parametr ω_H je závislý na konstrukci kompresoru a připojeného potrubí. Dle uvedeného modelu odpovídá frekvenci pompáže a tím dokazuje i tvrzení v minulé kapitole, že frekvence pompáže závisí na výkonových (konstrukčních) parametrech kompresoru. Dosazením skutečných parametrů kompresoru do vztahu (3.1.4 – 3) získáme orientační frekvenci pompáže.

Ze soustavy rovnic 3.1.4-4 - 3.1.4-7 lze vypočítat hodnoty poměrných hmotnostních toků a poměrné hodnoty tlaků.

Pro průběh mechanického příkonu turbokompresoru můžeme uvažovat že:

$$N \sim \Phi_c \cdot \Psi_c ,$$

kde N je mechanický příkon kompresoru

Potom můžeme s pomocí uvedeného matematického modelu a dosazením skutečných konstrukčních parametrů odvodit průběh a dynamiku mechanického příkonu turbokompresoru při pompáži.

Závěr kapitoly 3.1.4

V této kapitole jsem teoreticky popsal vznik pompáže. Matematických modelů pro tento stav je vytvořeno mnoho, použil jsem však model, z kterého je patrná závislost mechanického příkonu kompresoru (funkce stlačení – tlakové diference a hmotnostního toku) na pompážní proces. Prokázal jsem, že sledováním okamžitých hodnot příkonu synchronního motoru a jeho časových změn, konkrétně dP/dt , lze bezpečně vyhodnotit stav pompáže kompresoru a provést regulační zásah, resp. havarijní odstavení kompresoru. Pokud máme jistotu v bezpečném a jednoznačném stanovení okamžiku pompáže, můžeme zúžit bezpečnostní pásmo regulace a tím zvětšit regulační rozsah turbokompresoru.

3.1.5. Vibrace soustrojí turbokompresoru

[26]; [27]; [28] part From Analysis to Troubleshooting

Mechanický chod, konkrétně vibrace soustrojí jsou problémem, který se vyskytuje po celou dobu životnosti soustrojí a to od jeho výroby, až do jeho odstavení. Zvláště u soustrojí turbokompresoru, kde část kompresoru pracuje s provozními otáčkami okolo $12\,000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ je problematika mechanického chodu velmi důležitá. V průběhu výroby, jak pohonného motoru, tak kompresoru, jsou velmi pečlivě vyvažovány jednotlivé rotační komponenty

celého soustrojí. Mezioperačně se dovažují jednotlivé rotační komponenty soustrojí, na zkušebně se pak kontroluje mechanický chod a v případě potřeby se dovažují celé funkční celky.

Mechanický chod se hodnotí dle harmonizované normy ČSN ISO 10816 [28]; ČSN ISO 1940 [29] a souboru norem ČSN ISO 1925 [30]. V poslední jmenované normě jsou pro jednotlivé typy strojů poskytnuta vodítka pro hodnocení stavu stroje na základě dvou kritérií:

- a) velikost vibrací
- b) změna velikosti vibrací

Kritérium a): Velikost vibrací

Norma ČSN ISO 10816 je založena na měření celkové efektivní hodnoty rychlosti vibrací ve frekvenčním pásmu 10 až 1 000 Hz. Nejvyšší hodnota z měření na různých místech stroje se nazývá mohutnost vibrací. V normě jsou definovány mezní hodnoty mohutnosti vibrací, které zařazují stroj podle stavu do jednoho ze 4 pásem:

- pásmo A - v tomto pásmu mají být za obvyklých podmínek vibrace nově přejímaných strojů.
- pásmo B - stroje, jejichž vibrace leží v tomto pásmu, mohou být zpravidla provozovány po neomezeně dlouhou dobu.
- pásmo C - stroje, jejichž vibrace leží v tomto pásmu, jsou za normálních okolností považovány za neuspokojivé pro dlouhodobý a trvalý provoz. Obecně mohou být stroje za takovýchto podmínek provozovány do té doby, než se nalezne možnost nápravy.
- pásmo D - hodnoty vibrací v rámci tohoto pásma jsou za normálních okolností považovány za natolik nebezpečné, že mohou vyvolat poškození stroje.

Zařazení stroje do pásma napomůže k rozhodnutí o dalším provozu stroje a navržení potřebných opatření (např. okamžité odstavení, provoz do další plánované opravy apod.). Hranice pásem nejsou striktní, ale jedná se o směrné hodnoty, které mohou být na základě zkušeností výrobce nebo provozovatele upraveny.

Části normy 2 až 7 definují mezní hodnoty mohutnosti vibrací pro jednotlivé typy strojů.¹⁶

- hranice pásem A/B $0,71 - 4,5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$
- hranice pásem B/C $1,8 - 9,3 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$
- hranice pásem C/D $4,5 - 14,7 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$

Je vidět, že hranice pásem jsou stanoveny poměrně široce. V normě se dále uvádí, že malé stroje (například elektromotory s výkonem do 15 kW) mají tendenci být na dolním konci rozsahu a větší stroje (například pohony na uložení, které je pružné ve směru měření) mají tendenci být na horním konci rozsahu.

Dle zkušeností ze zkušeben el. strojů točivých a kompresorů se za uspokojivý mechanický chod považovaly vibrace do $1 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, stroje, u kterých vibrace překročily $2,8 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ bylo nutné dovážet.

¹⁶ Stroje, které nejsou v těchto částech uvedeny, se posuzují podle dodatku k části 1: ČSN ISO 10816-1/Amd.1:

Kritérium b) : Změna velikosti vibrací

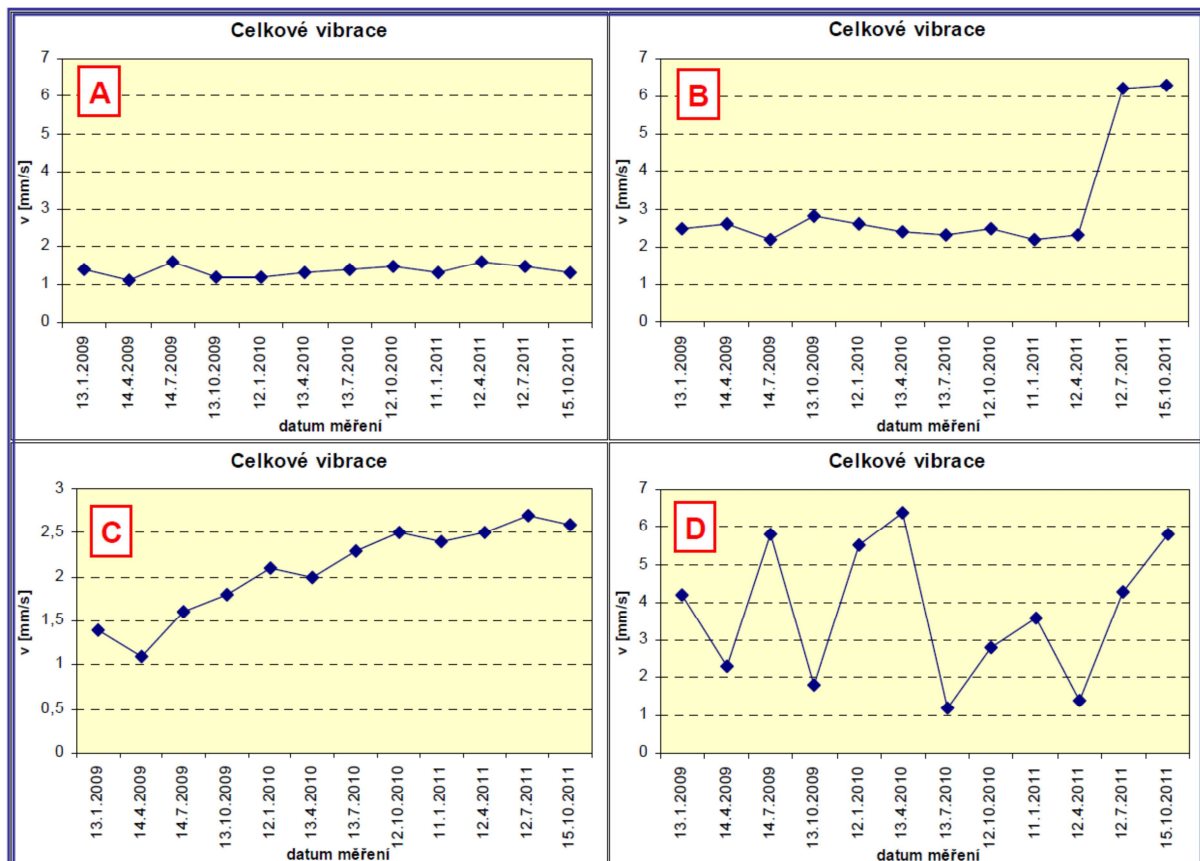
Podle tohoto kritéria se posuzují změny velikosti vibrací vzhledem k předem stanovené referenční (základní) hodnotě. Ta je určena za ustálených provozních podmínek, při dobrém provozním stavu stroje. Je to většinou referenční hodnota, naměřená při uvádění stroje do provozu. Ta se může velmi lišit od podmínek provozu. Záleží na skuplování (spojení ve spojce) stroje, ustavení na základě, vlastnosti základu, vyrovnání mg. neutrály a dalších podmínkách.

Provozem se velikost vibrací může podstatně zvýšit nebo snížit, a přestože vibrace nedosáhnou pásma C podle kritéria I, může si to vyžádat nějaké opatření. Takové změny mohou být skokové nebo postupné.

Hodnocení stroje dle kritéria b) vyžaduje jeho dlouhodobější sledování.

Diagnostické měření vibrací má dvě výrazně rozdílné fáze:

1. Trvalé sledování stroje, pro které se používá termín „monitorování“. Účelem je zjistit odchylku od normálního stavu - detekovat závadu.
2. Vlastní analýza problému, pro kterou se používá termín „diagnostika“ v užším slova smyslu. Účelem je zjistit příčinu odchylky – vznikající poruchu, případně stanovit trend rozvoje závady a zjistit základní příčinu vzniku závady.



Obrázek 15 - Trendy sledovaných veličin vibrací [26]

Jedním z nejdůležitějších nástrojů při monitorování jsou „trendy“ hodnot sledovaných veličin, tedy vývoj sledované veličiny v čase. Na obr. č. 15 jsou znázorněny čtyři možné trendy:

A - setrvale dobrý stav, bez závady

B - náhlá změna (odlomení části zařízení, porucha, apod.). Je nutné si uvědomit, že závažnou změnou je jak náhlé zvýšení vibrací, tak jejich náhlý pokles. Pokud např. setrvalá úroveň vibrací byla způsobena nevyvážeností, pak náhlý pokles vibrací může znamenat, že se odlomila část zařízení a došlo ke spontánnímu vyvážení stroje - přesto ale ulomená část může způsobit závažnou následnou poruchu.

Někdy může být tento vývoj vibrací způsoben vlivem nesprávného zásahu údržby při opravě stroje. Proto je třeba dodržovat zásadu, že vibrace se měří jak před provedením opravy, tak krátce po ní.

C - typický trend při postupném poškození, např. v důsledku opotřebení

D - nesmyslný "trend" - může být způsoben například nevhodným výběrem místa měření, špatným uchycením snímače apod.

Provozní meze vibrací

V praxi se v případě dlouhodobého sledování některých druhů strojů stanovují provozní poplachové meze vibrací. Mají dvě formy:

VÝSTRAHA - Slouží k varování, že bylo dosaženo definované hodnoty vibrací, nebo že se vyskytla významná změna, po níž může být nutné učinit nápravné opatření. Provoz stroje může obecně pokračovat po dobu, než se navrhne nápravné opatření.

PŘERUŠENÍ PROVOZU - Slouží ke stanovení velikosti vibrací, jejíž překročení může při dalším provozu způsobit poškození stroje. Při překročení této hodnoty musí být okamžitě učiněno nápravné opatření nebo se stroj musí vypnout.

Pro různá měřicí místa a směry měření mohou být stanoveny rozdílné provozní meze odrážející rozdíly v dynamickém zatížení a tuhosti uložení. Norma ČSN ISO 10816 uvádí směrnice ke stanovení kritérií pro obě provozní meze stanovených druhů strojů. Konkrétní meze se stanovují dle zkušeností a doporučení výrobce.

Fourierova transformace

Průběh vibrací není, až na vzácné výjimky, striktně sinusový. Rozbor složek průběhu vibrací nám poskytne cenné vodítko při zjišťování původu vibrací. K tomu nám slouží rozbor periodického průběhu na vyšší harmonické složky, tzv. Fourierova transformace.

[22] Funkce $\mathbf{x}(t)$, periodická v čase \mathbf{T} , může být vyjádřena jako nekonečná posloupnost:

$$X(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cdot \cos(n\omega t) + b_n \cdot \sin(n\omega t)]; \quad \omega = \frac{2\pi}{T}$$

Tento vztah znamená, že původní funkci $\mathbf{x}(t)$ lze složit z (nekonečně) mnoha sinusovek, které mají různé amplitudy a jejichž frekvence jsou násobky základní frekvence ω . Koeficienty \mathbf{a}_n a \mathbf{b}_n jsou *Fourierovy* neboli *spektrální* koeficienty funkce $\mathbf{x}(t)$ a mohou být vypočteny pomocí vztahů:

$$a_n = \frac{2}{T} \cdot \int_0^T x(t) \cdot \cos(n\omega t) dt$$

$$b_n = \frac{2}{T} \cdot \int_0^T x(t) \cdot \sin(n\omega t) dt$$

V současných analyzátoch se používá algoritmus tzv. rychlé Fourierovy transformace (FFT - Fast Fourier Transform), kde je, z důvodu složitosti zpracování signálu a výpočtu, omezeno horní i spodní frekvenční spektrum (a tím hodnocený počet harmonických složek) na potřebnou hodnotu. Tento parametr je ve vyvažovacích analyzátoch nastavitelný a pro soustrojí turbokompresorů se běžně zobrazují vyšší harmonické složky vibrací do 30. – 50. složky a složky subharmonické do cca 10. složky.

Výsledky Fourierovy transformace

Rozklad průběhu vibrací na harmonické složky není cílem analýzy vibrací, ale pouze nástrojem. Ten pomáhá určit zdroj, či příčinu vibrací. Při práci na zkušebně el. strojů točivých jsem zpracoval interní předpis pro definování zdroje vibrací na základě rozboru vyšších harmonických [27].

Z něho vybírám pro ukázkou:

1. harmonická složka:

- Klasická statická nevyváženost, projevující se na obou ložiskách motoru se shodným úhlem. Osa nevyváženosti je rovnoběžná s osou rotoru. Lze ji dovážit standardním postupem
- Momentová nevyváženost (tzv. klika), jedná se o statickou nevyváženost s opačným úhlem ($\alpha + 180^\circ$). Osa nevyváženosti není rovnoběžná s osou rotoru. Lze ji dovážit standardním postupem, je nutné analyzovat vývažek na obou stranách rotoru. Tato nevyváženost se projevuje obsahem 2. harmonické složky, což je obraz vibrací z protějšího ložiska. Po vyvážení tato složka zanikne.
- Obecná dynamická nevyváženost je kombinací výše uvedených nevyvážeností. Lze ji dovážit standardním postupem, je nutné analyzovat vývažek na obou stranách rotoru. Tato nevyváženost se může projevovat i některými složkami vyšších harmonických. Po dovážení tyto složky zaniknou.

2. harmonická složka:

- může se jednat o vliv dynamické, nebo momentové nevyváženosti, proto je nutné tyto dovážit
- Tato harmonická složka vzniká převážně v ložiskách a to především kluzných, kdy čep ložiska vykazuje nadměrnou ovalitu (může se jednat o rozdíly v řádech μm)
- špatně skuplované soustrojí může také vyvolat 2 harmonickou složku vibrací – pokud se jedná o nesouosost – zlom ve spojení

3. harmonická složka

- bývá většinou buzena ve valivých ložiskách, nerovnoměrností čepů, valivých elementů (válečků, kuliček)

Další vyšší harmonické složky

- bývají většinou buzeny ve valivých ložiskách, mechanickým poškozením, např. tzv. „brinelováním“, tj. poškozením čepu ložiska při dopravě, nebo skladování, pokud není hřídel stroje odlehčena. Potom vyšší harmonická složka vibrací odpovídá počtu valivých elementů ložiska.

Tento problém vznikal u strojů s valivými ložisky, které byly přepravovány na dlouhé vzdálenosti po železnici. Ložiska byla namáhána velkým tlakem (hmotnost rotoru), bez protáčení a stálými vibracemi, které jsou přítomny při železniční přepravě. Někdy docházelo k úplnému zničení valivých ložisek a jejich následné výměně. Proto se začala provádět některá opatření, aby k těmto poškozením nedocházelo. Motory se převážely s nadlehčenými rotory, s přípravkovými ložisky, nebo s rotory v přípravkových stojanech. Motory s kluznými ložisky se převážely v dřevěných ložiskových výstelkách.

Analýza vyšších harmonických složek poskytuje velmi cenné informace. Je však nutné znát informace o daném soustrojí a dle toho definovat zásahy, které je nutné provést při výskytu příslušné harmonické složky. [27]

Vliv základu na mechanický chod soustrojí

Vliv základu na mechanický chod soustrojí může být značný. Pokud není mechanický chod soustrojí ideální, dochází k tomu, že nekvalitní, nebo špatně navržený, či provedený základ vibrace soustrojí zesiluje. Jaké parametry základu hrají roli:

- Kvalita základu (materiál, vyrovnání). Zvláště vyrovnání, kvalita materiálu pod patkami soustrojí, a jejich vodorovnost hraje velkou roli. Pokud je soustrojí špatně ustaveno, může být, vlivem „prošponování“, nebo nevodorovného ustavení značně zhoršen mechanický chod.
- Návrh, výpočet konstrukce – pokud je základová deska, portál, či konstrukce hmotnostně srovnatelná se soustrojím, nebo vlastní frekvence základu je shodná s vlastní frekvencí soustrojí, nebo jeho komponentů, může docházet k interferenci, která má velmi negativní důsledky

Podmínky pro kvalitní základ soustrojí:

- hmotnost základu musí být několikanásobně vyšší, než hmotnost soustrojí,
- vlastní frekvence základu nesmí být shodná s vlastní frekvencí soustrojí a jejími harmonickými složkami,
- základ by měl být vibračně oddělen od základu jiných soustrojí, nebo základu budovy,
- základ by měl mít kvalitní dosedací plochy, frézované a vyrovnané do vodorovné polohy a kvalitně ustavené,

- v základové desce musí být kvalitně uchycené matky pro základové šrouby, přes které se přenášejí vibrace na základ.

Je nutné si však uvědomit, že základ není aktivním zdrojem vibrací, ale může být jeho tlumičem, či zesilovačem. Důležité tedy je, aby mechanický chod samotného soustrojí z výroby byl co možná nejlepší, aby byla věnována co možná nejlepší péče ustavení soustrojí od stavění jednotlivých komponentů, po skuplování celého soustrojí. U elektropohonu pak je nutné věnovat velkou pozornost vyrovnání magnetické neutrály. Toto mechanické ustavení rotoru vůči magnetickému poli statoru má velký vliv především na vibrace v axiálním směru a na životnost ložisek, které zajišťují axiální držení (to jsou většinou ložiska převodovky).

Tuhost základu hraje roli také v případě, že na stejném místě pracují dva stroje shodné konstrukce. Může se stát, že vibrace soustrojí mají stejnou fázi. V tomto případě se jejich výchylky sčítají, což značně zhorší celkový mechanický chod každého stroje. Zde pomůže natočení jednoho z rotorů o 180° prost., tzn., mechanická nevyváženost každého stroje pracuje v opačné (nebo jiné) fázi. V ideálním případě se fáze vibrací navzájem odečtou. K tomuto slouží funkce pootočení rotoru vůči točivému poli statoru, která se nazývá „detaktace“.

Této funkce bylo použito např. na dole Zbýšov u Brna, kde v těžní věži pracovala dvě W-L soustrojí na společném základu. Pokud byly spuštěny obě soustrojí tak, že se jejich nevyváženosti fázově sčítaly, rozkmitala se celá konstrukce těžní věže. Funkcí „detaktace“ – řízeného proklouznutí o jednu pólovou rozteč - byla eliminována součtová nevyváženost obou rotorů tak, že se vlivy nevyvážeností jednotlivých rotorů navzájem rušily. Tak byly odstraněny rezonanční kmity některých konstrukčních částí ocelové těžní věže. Detaktace byla provedena pomocí reverzace budícího proudu.

3.2. Pohonné motory turbokompresorů

Turbokompresory bývají poháněny mnoha druhy pohonných strojů. Jsou to například:

- parní turbíny,
- spalovací turbíny,
- expanzní turbíny,
- elektromotory:
 - synchronní motory,
 - asynchronní motory,
 - stejnosměrné stroje.

Z technického hlediska jsou pro pohon turbokompresorů nejvýhodnější parní, nebo spalovací turbíny, nebo, v současné době snadno technicky realizovatelné, nicméně stále velmi nákladné, regulované elektropohony. Pomocí nich lze bezproblémově regulovat otáčky turbokompresoru a tím i výkon (dopravované množství), nebo výstupní tlak. Regulace výstupních veličin turbokompresoru změnou otáček je nejefektivnější způsob regulace. Vzhledem k vysokým provozním otáčkám turbín je možno použít přímý pohon, bez převodovky (což má, mj., velký vliv na účinnost celého soustrojí).

3.2.1. Pohon elektromotorem

Pohon turbokompresoru elektromotorem je dnes nejčastějším řešením a to díky své jednoduchosti a ceně. Nevýhodou jsou nízké synchronní otáčky pohonných elektromotorů, což vyžaduje ve většině případů použití zvyšovací převodovky. Převodový poměr u střídavých elektrických motorů bývá okolo 1 : 7. Používají se motory jak asynchronní (malé výkony, cca do 1 MW), tak i synchronní, většina s $2p = 4$ ($n_s = 1500 \text{ min}^{-1}$).

3.2.1.1. Synchronní motory

Synchronní motory mají výhodu konstantních otáček, které jsou dány pouze napájecí frekvencí a počtem pólových dvojic. U asynchronních motorů jsou otáčky závislé na zatížení a to v rozsahu řádově jednotek procent. Nezanedbatelnou vlastností synchronních strojů je možnost regulace odebírané, či dodávané jalové energie. [4] U synchronního pohonu turbokompresoru je možno využít výkonovou rezervu stroje ke kompenzaci jalové energie a tím nahradit velmi nákladná statická kompenzační zařízení.

Další výhodou synchronního pohonného motoru je také, při chodu v režimu na $\cos \varphi = \text{konst.}$, stabilizace síťového napětí a vyrovnání napěťových výkyvů. Tento stav může nastat např. při rozběhu velkých střídavých motorů pracujících na stejné sběrnici. Nabuzený synchronní motor kompenzuje odebíranou jalovou složku energie a tím proudově odlehčuje distribuční transformátor, tzn., snižuje úbytky na jeho impedancích.

Problémem synchronních strojů je rozběh a jeho synchronizace. Rozběh soustrojí se synchronním motorem je podrobně řešen v kapitolách 3.2.4 a 3.2.5.

3.2.1.2. Asynchronní motory

Z výše uvedeného vyplývají výhody použití synchronních motorů pro větší výkony oproti motorům asynchronním. U soustrojí menších výkonů (cca 0,5 - 1 MW) již výhody regulace jalového výkonu nejsou tak prioritní, proto se používají, z důvodů ceny, jednoduchosti a tím i nízkých nákladů na servis a údržbu, motory asynchronní.

Asynchronní motory mají i nespornou výhodu při rozběhu. Jejich momentová charakteristika je příznivější, než u synchronních strojů. Rozběh soustrojí turbokompresoru s asynchronním pohonem bývá většinou bezproblémový.

3.2.1.3. Stejnosměrné motory

Pro pohony turbokompresorů se již prakticky nepoužívají. Tyto motory jsou výrobně drahé a vyžadují mnohem náročnější kontroly a údržbu. Stejně tak je velmi nákladný regulační napájecí systém. Pokud je požadavek na regulaci otáček, je výhodnější použít střídavé motory a frekvenční měniče.

Vzhledem k minimálnímu využití stejnosměrných motorů v současné době, nebudu se dále v této práci tímto druhem pohonného motoru zabývat.

3.2.2. Synchronní stroje

3.2.2.1. Synchronní stroje obecně

[32] [33] [34] [35] Synchronní stroje jsou asi nejrozšířenějším druhem točivých strojů, pohánějící turbokompresory středních a velkých výkonů. Vzhledem k definovanému převodu otáček rotoru synchronních strojů ke statorové frekvenci a možnosti regulace jalové složky energie jsou synchronní stroje hojně využívány pro řadu různých aplikací. Jsou to např. synchronní generátory, pohonné motory turbo, nebo pístových kompresorů, dmychadel, důlních ventilátorů, pohonů kulových mlýnů v cementárnách, W-L soustrojí a rotačních měničů frekvence pro drážní aplikace.

V dalších odstavcích se budu podrobně věnovat jednotlivým možnostem použití synchronních strojů. Také chci vyzdvihnout jejich kladné a záporné vlastnosti pro danou aplikaci.

3.2.2.2. Synchronní generátory

Synchronní generátory přeměňují rotační (mechanickou) energii v energii elektrickou.

Synchronní generátory vyhovují svými vlastnostmi jak pro práci v ostrovní síti (tzn. bez přítomnosti jiných paralelně pracujících zdrojů el. energie), tak pro paralelní provoz se sítí. Velkou výhodou je, že kromě dodávky činné energie do sítě, umožňuje synchronní generátor ovlivňovat také jalové složky energie v síti – kompenzovat, nebo dekompenzovat (eliminovat odběr, či dodávku jalové energie).

Synchronní generátory můžeme v zásadě rozdělit na dvě základní skupiny – turbogenerátory a pomaloběžné generátory.

Synchronní turbogenerátory jsou konstruovány jako vysokootáčkové synchronní stroje (většinou $2p = 2$, nebo $2p = 4$), kde pohonným strojem jsou tepelné, či plynové turbíny. Většinou se jedná o stroje s hladkým rotorem (především pro minimalizaci mechanických ztrát) o průměru obvykle menším, než 1000 mm (pro minimalizaci odstředivých sil při vysokých otáčkách). Rotory jsou dlouhé a úzké, což má negativní vliv na mechanický chod těchto strojů. Díky své délce a malému průměru dochází k průhybu rotoru a vzniku mechanických rezonancí v oblasti pod jmenovitými otáčkami. Opatření na zamezení těchto vlivů bývají složitá a provozně náročná (dlouhé řízené doběhy, protáčení soustrojí do úplného vychlazení rotoru, pomalý a definovaný start s rychlým přeběhem kritiky, atp.). Soubor těchto negativních vlastností se projevil také při provozních zkouškách největšího synchronního generátoru o výkonu 1 GVA v jaderné elektrárně Temelín.

Pomaloběžné generátory nacházejí největší využití převážně ve spojení s vodními turbínami. Jedná se většinou o mnohopólové stroje se jmenovitými otáčkami od desítek do stovek ot/min.

Hydrogenerátory se využívají ve vodních elektrárnách ve spojení s vodními turbínami (Kaplanovými, Francisovými, nebo Peltonovými). Výkon hydrogenerátoru je závislý na množství vody a výšce vodního spádu. Na rozdíl od turbogenerátorů se hydrogenerátory konstruují jak vertikální, tak horizontální (většinou u Peltonových turbín). Hydroalternátory představují jedny z největších elektrických točivých strojů (stavební výška s příslušenstvím až 30 m – včetně pomocných budičů a budičů, průměr až 15 m). Hydroalternátory mají rotory s vyniklými póly. Velké stroje mívají na rotoru tlumič - amortizér, který při nárazových zatíženích zamezuje tzv. kývání rotoru, jiná soustrojí bývají doplněna mechanickým setrvačnickem. Amortizér také potlačuje vyšší harmonické složky v napájecí síti (a to i netočivé). U generátorů proto musí být na tato přídatná zatížení amortizér dimenzovaný.

3.2.2.3. Synchronní kompenzátory

Synchronní kompenzátory jsou synchronní stroje pracující naprázdno na napájecí síti, tzn., nejsou zdrojem žádného mechanického rotačního výkonu, jsou zdrojem pouze výkonu jalového. Velikost jalového výkonu je regulována budičem. Mohlo by se zdát, že rotační kompenzátory jsou v dnešní době, kdy se používají polovodičová filtrační a kompenzační zařízení, polovodičové kondicionéry a jiná moderní kompenzační zařízení, archaismem. Přesto však je v provozu několik velkých kompenzačních stanic s rotačními kompenzátory, které prodělaly v posledních letech rozsáhlé modernizace. Jejich výhoda je ve velkém kompenzačním výkonu (jsou to řádově desítky Mvar), a v kompenzačním rozsahu, který je plynulý od nuly do jmenovitého kapacitního výkonu. Mohou však i v omezeném rozsahu dekompenzovat, tzn. odebírat ze sítě jalovou energii.

Mohu např. jmenovat kompenzační stanici na Dole Lazy OKD, 2x 15Mvar a 1x 5 Mvar, na dole ČSA Karviná (3x 5 Mvar). V roce 2000 se postavila nová kompenzační stanice na transformovně Pražské energetiky - TR 110 kV - Východ, 6 kV, 800 kvar, právě pro možnost

dekompensace. Tato KZ byla však po několika letech zrušena díky přechodu z napěťové hladiny 6 kV na 22 kV.

U rotačních kompenzátorů jsou hlavním regulačním prvkem budiče a přesnost regulace je závislá na kvalitě regulace budícího proudu.

3.2.2.4. Synchronní motory

Problematika synchronních motorů je velmi široká. Budu se proto zabývat pouze vlastnostmi, které souvisí s problematikou mé DP. Jsou to:

- rozběh synchronního motoru, definovaný okamžik nabuzení a synchronizace
- definice chodu synchronního motoru, regulace jalového výkonu, kompenzace jalového výkonu místní/vzdálená
- optimalizace zatížení elektromotoru
- ochrany elektromotoru

Synchronní motory jsou elektrické stroje, přeměňující elektrickou energii na mechanickou. Rotor synchronních motorů se otáčí synchronně s magnetickým polem statoru.

3.2.2.5. Konstrukce synchronních motorů

Stator synchronního motoru

Synchronní motor má konstrukčně shodný stator, jako stroj asynchronní. Ve statorovém jhu, skládaném z navzájem izolovaných, magneticky orientovaných plechů, je umístěno třífázové, rovnoměrně prostorově rozložené vinutí. Jak jsem již uvedl, statorové vinutí je shodné s vinutím asynchronních strojů. V bývalém závodě ČKD Elektrotechnika byl v druhé polovině 80-tých let na MSV v Brně oceněn zlatou medailí stroj, kde do společného statoru bylo možno umístit jak asynchronní rotor s kotvou nakrátko, tak rotor s vyniklými póly a bezkontaktním budičem. Byl to první ze strojů tzv. 4-té řady, která se poté vyráběla až do konce produkce točivých strojů v ČKD Elektrotechnice.

Rotor synchronního motoru

Rotory synchronních strojů bývají konstruovány jako „hladké“, tzn. válcovitého tvaru, nebo s vyniklými póly.

Hladké rotory synchronních motorů

Hladké rotory synchronních strojů se používají pro vysokootáčkové stroje, převážně $2p = 2$. Díky malému průměru rotoru nejsou vinutí rotoru a ostatní mechanické rotující části nadměrně namáhány odstředivými silami. Magnetický obvod rotoru, včetně hřídele se vyrábí z výkovků, proto masiv rotoru plní současně i funkci tlumícího, popř. rozběhového vinutí. Čela budícího vinutí jsou mechanicky chráněna proti vlivu odstředivých sil stahovacími kruhy, tzv. kapnami. Tyto bývají také vykovány z masivních kusů železa a dále obráběny.

Rotorová vinutí hladkých rotorů jsou vyrobena z plochého měděného vodiče (vinuté naplocho) s prokládanou izolací. Vinutí je vyvedeno na rotorové kroužky, nebo k rotoru bezkontaktního budiče (drážkami, nebo vývrtem v hřídeli). Synchronní motory s hladkým rotorem jsou, díky malému rozdílu mezi příčnou a podélnou impedancí, náchylné k výpadkům ze synchronizmu (k prokluzu může dojít a dochází, pokud je $\cos \varphi$ menší než 0,85 ind.). Problémem u synchronních strojů s hladkým rotorem je i rozběh; tyto stroje mají nízký záběrný moment a často nebývají rozbíhány asynchronním rozběhem, ale buď rozběhem frekvenčním, nebo cizím motorem.

Z výše uvedených důvodů se synchronní motory s hladkým rotorem používají převážně u turbogenerátorů a strojů se speciálním řízením. V ČKD Elektrotechnice se vyráběly synchronní stroje 25 MVA jako pohon turbokompresorů v čerpacích stanicích tranzitního plynovodu – celkem cca 30 strojů. Jednalo se o synchronní motory se jmenovitým napětím 10 kV, $2p = 2$, s proměnnými otáčkami 2 400 – 3 600 (4 250) min^{-1} .

Rotory s vyniklými póly

Tyto rotory se používají u strojů s počtem pólů $2p = 4$ a vyšším. Hřídel rotoru je z opracovaného výkovku s úchyťovým systémem na póly, což bývají „rybiny“ a „kladiva“, nebo šroubová spojení, nebo kombinace obojího. Jednotlivé póly jsou vyrobeny buď z výkovku, nebo jsou složeny z neizolovaných plechových výlisků – což je výrobně jednodušší a levnější. Tento systém výroby se používá převážně pro menší póly, které jsou u vícepólových strojů.

Rotorové vinutí je vyrobeno (u motorů ČKD Elektrotechnika) z Cu pasoviny vinuté naplocho. V závorce jsem uvedl „u motorů ČKD“. Synchronní motory ČKD byly počítány na nízká rotorová napětí (cca 35 - 90 V DC) a vyšší proudy, proto musí být průřez vodiče rotorového vinutí na tyto proudy dimenzovaný. Oproti tomu synchronní stroje výroby např. Škoda Plzeň, nebo TES Vsetín jsou počítány na vyšší napětí rotoru (100 – 200 V) a nižší proudy, takže zde je mnohdy použit na rotorová vinutí izolovaný kruhový, nebo profilový vodič.

Vývody rotorového – budícího vinutí jsou vyvedeny po hřídeli, nebo vývrtem ve hřídeli na rotorové kroužky, nebo na budící dynamo, nebo bezkontaktní budič. Sběrací kroužky bývají umístěny buď letmo za ložiskovými stojany, nebo mezi ložiskem a krytem motoru.

U strojů, které jsou navrženy do prostředí s nebezpečím výbuchu, bývají sběradla umístěna v krytu s trvalým přetlakem, s přívodem vzduchu z prostoru mimo výbušné prostředí, nebo pod pevným uzávěrem. Poslední jmenované konstrukční umístění má nevýhodu pro provádění pravidelných kontrol sběracích ústrojí. Pravidelné revize kroužků a sběradel jsou pro správný bezporuchový chod synchronního stroje velmi důležité.

Problémy s přenosem budícího výkonu do rotoru

Tradiční způsob – přenos přes kroužky – má výhodu ve snadné (odborně nenáročné) kontrole a jednoduchosti. Sběrací kroužky se vyrábějí se sběrací plochou hladkou - kroužky představují kovový prsteneček, nasazený přes izolační mezikus na hřídel. Vyrábějí se také, především u strojů větších výkonů, s vyfrézovanou šroubovou drážkou na kontaktním

povrchu kroužků. To má pozitivní vliv na udržování dokonalé aktivní plochy uhlíků a také na chlazení dotykové plochy uhlíků a sběracích kroužků.

Je nutné provádět pravidelnou kontrolu a údržbu sběracího ústrojí. Ta spočívá především v:

- kontrole stavu uhlíků, jejich opotřebenosti,
- zajištění jejich pravidelné výměny,
- čištění prostoru sběradel od uhlíkového prachu, kontrole izolačních stavů uhlíků a rotorového vinutí.

Tyto kontroly se provádějí s pravidelností od jednoho týdne, až měsíce, dle provozu stroje.

Vyskytují se však i problémy, které jsou mnohdy technicky těžko řešitelné a vyžadují zásah specializovaného technika, nebo firmy.

Jedná se např. o:

- nadměrný a rychlý úbytek uhlíků. Setkal jsem se s případem, kdy bylo nutné vyměňovat uhlíky u synchronního pohonu (polské výroby) turbokompresoru jednou týdně. Nutnost takto časté výměny uhlíků je problém jednak finanční a jednak provozní (nemožnost odstavení stroje, vytíženost údržby...),
- jiskření uhlíků, což má za následek také nadměrný úbytek uhlíků a hlavně trvalé poškození povrchu sběracích kroužků.

Nápravy a řešení těchto problémů u strojů v provozu nejsou technicky i realizačně jednoduché, znamenají mnohdy konstrukční úpravy sběracích ústrojí i uhlíků, změnu materiálu uhlíků, změnu rozměrů a proudového zatížení uhlíků, změnu přitlačného tlaku na kroužky atp.

Sběrací kroužky se neopotřebávají stejně. Je provozně odzkoušeno, že kroužek s „-“ pólem se opotřebává jinak a více, než kroužek s polaritou „+“. Proto doporučujeme po cca 4 000 provozních hodinách provést změnu polaritu budícího vinutí.

3.2.3. Buzení synchronních motorů, druhy a jejich vlastnosti

Budiče a jejich systémy, jsou zařízení, která napájí rotor synchronního motoru stejnosměrným proudem.

Budič musí zajistit následující:

1. budit synchronní stroj tak, aby splňoval požadované regulační funkce a aby nevypadl ze synchronizmu,
2. zkratovat rotor synchronního stroje při rozběhu, nebo přechodových (havarijních) stavech,
3. synchronizaci rotorového magnetického pole s točivým magnetickým polem statoru pro zdárné ukončení rozběhu.

V dalších odstavcích chci provést rozdělení budičů podle konstrukce a funkce, popsat, jak splňují výše uvedené podmínky a rozebrat jejich výhody a nevýhody.

Budiče můžeme rozdělit podle jejich konstrukce do několika skupin:

- budiče, které přenášejí budící výkon přes kroužky
 - budiče statické - většinou polovodičové
 - budiče rotační
 - dynam, umístěná na společné hřídeli se synchronním motorem
 - derivační
 - cize buzená
 - budící soustrojí, umístěná odděleně od synchronního motoru
 - vertikální konstrukce
 - horizontální konstrukce
- budiče bezkontaktní, které přenášejí budící výkon pomocí:
 - rotačního transformátoru
 - třífázového synchronního alternátoru s budícím vinutím na statoru
 - třífázového asynchronního motoru s vinutou kotvou, která je točena proti směru točivého pole statoru

Budící systémy s přenosem budícího výkonu přes sběrací kroužky

Tento způsob přenosu budícího výkonu přes kroužky je základním a nejstarším způsobem buzení synchronních strojů. Nevýhody a problematiku tohoto systému jsem popsal již v předchozích kapitolách. Její hlavní nevýhoda spočívá principiálně v nutnosti údržby, pravidelných kontrol a výměny uhlíkových kartáčů. Pokud jsou tyto dobře navrženy (návrhovým parametrem je obvodová rychlost kroužku, proud a napětí, tvar, proudová zatížitelnost, přítlak a materiál sběracích kartáčů a kroužků), mají poměrně dlouhou trvanlivost; uvádí se 4 000 – 5 000 provozních hodin. Životnost uhlíků je dále závislá na vibracích stroje, umístění sběracího soustrojí, ovalitě a povrchu sběracích kroužků, čistotě prostředí (prašnost, olej), teplotě okolí a dalších parametrech. Jak jsem již uvedl, setkal jsem se s problémem, kdy bylo nutno uhlíky vyměňovat jednou týdně. Naopak není výjimkou životnost uhlíků delší jak 12 měsíců provozu stroje.

Stejnoseměrná dynam umístěná na hřídeli synchronního motoru

Nejběžnější systém buzení synchronních strojů staršího data výroby. Stejnoseměrná dynam jsou většinou spojena přes spojku s rotorem synchronního motoru a jsou letmo umístěná na předním konci hřídele. Ve většině případů se jedná o dynam s derivačním buzením, kde regulace budícího proudu se provádí změnou odporu v derivačních obvodech dynam. Tato regulace je v podstatě regulací na konstantní budící napětí, nemá žádné omezovače (nadproud, podbuzení) a klade velké nároky na kvalitu, zručnost a znalosti obsluhy.

U zrekonstruovaných pohonů jsou dynam cize buzeny; budící proud synchronního motoru je regulován budícím proudem dynam. Ten řídí regulátory různého stupně složitosti. Od jednoduchých (s řízením na proud rotoru SM a s jednoduchou regulací jalového výkonu synchronního motoru – tzv. „statikou“), až po velmi složité a inteligentní systémy řízení s plným regulačním komfortem.

Vzhledem k tomu, že kotva DC dynama je přímo spojena s budícím vinutím, je při rozběhu synchronního motoru budící vinutí zkratováno přes kotvu dynama.

Nevýhodou a také důvodem k náhradě těchto budičů za budiče většinou statické – polovodičové, jsou vysoké nároky na údržbu tohoto systému buzení. Nejedná se v tomto případě pouze o sběrací ústrojí synchronního motoru, ale především o DC dynamo, jeho sběradla a komutátor. Náklady na opravu DC dynama, která mnohdy spočívá v opravě, nebo výměně komutátoru bývají srovnatelné s náhradou za statický budič.

Dynamika regulace jalové energie synchronního stroje je mnohdy také nevyhovující, protože je nutné počítat s časovou konstantou DC dynama. Časové konstanty u těchto druhů buzení se pohybují od 500 ms do cca 1 s.

Buzení synchronních strojů bývalo také realizováno z malých rotačních soustrojí (DC dynamo není „nakuplováno“ na rotor buzeného synchronního motoru, ale je spojeno s vlastním pohonným motorem, většinou asynchronním). Tyto rotační budící soupravy bývaly realizovány v provedení jak horizontálním, tak vertikálním.

3.2.3.1. Stacionární polovodičové budící zdroje

Standardně používané budící stacionární polovodičové zdroje se skládají z napájecího transformátoru a řízeného třífázového usměrňovače. Napájecí transformátor zde plní funkci galvanického oddělení budícího vinutí od napájecí sítě (DC budící soustava je galvanicky oddělená soustava IT) a dále upravuje hladinu napájecího napětí pro tyristorový řízený usměrňovač.

Stacionární budiče ČKD typu ABN byly třífázové napůlřízené usměrňovače s nulovou diodou. Řízené byly z regulátoru NOCONTA ČKD Polovodiče (regulační systém URS) a zajišťovaly pouze regulaci na konstantní budící proud. Žádaná hodnota proudu se zadávala potenciometrem z předních dveří rozváděče, nebo z ovládacího panelu synchronního motoru. Přibližně v polovině 80-tých let byla tato regulační část nahrazena regulační vanou UCS 166 (regulační systém ALMEZ), která byla vyráběna v ČKD Elektrotechnice. Tato regulace již byla poměrně komfortní. Kromě základní regulační smyčky na konstantní budící proud obsahovala i nadřazenou regulační smyčku na konstantní účinník stroje. Zásadní změnou byl způsob zadávání pomocí digitální zadávací jednotky. Žádost o proud, či účinník se zadávala logickými signály „více“ a „méně“; což bylo imunní proti rušení a umožňovalo to řízení ze vzdálených míst.

Okamžik nabuzení a synchronizace zde byl odvozován od rotorové frekvence (\approx skluzové frekvence) pomocí frekvenčního relé. Při rozběhu byl rotor zkratován výkonovým stykačem, nebo tzv. „CL“ vypínačem.

Stacionární budící zdroje vyráběné v současné době mají řízení mikroprocesorové, což umožňuje uživatelsky nastavit potřebné regulační vlastnosti a mají také vysoký komunikační komfort. Tyto budiče se ovládají a vizualizují z ovládacího (dotykového) panelu, kde je možné odečíst nejen aktuální analogové a stavové veličiny budiče i synchronního motoru, ale i historii chodu a poruch. Standardem je komunikace po sběrnici, která umožňuje vizualizovat

všechny hodnoty na řídicím počítači a také buzení dálkově ovládat. Regulační možnosti současných budičů proberu v dalších kapitolách.

3.2.3.2. *Bezkontaktní budící systémy*



Obrázek 16 - Rotační usměrňovač bezkontaktního budiče typu RBL

usměrňovač (obr. č. 16), který se skládá z můstkového diodového usměrňovače, komutačních ochran a přepětí ochrany, která při vzniku přepětí větším než 700 V zkratuje rotorové vinutí. Toto přepětí vzniká hlavně při rozběhu synchronního motoru a v přechodových, či havarijních stavech (zkraty, výpadky ze synchronizmu). Výstup rotačního usměrňovače je přímo připojen na budící (rotorové) vinutí synchronního stroje. Spojky mezi rotačním usměrňovačem a budícím vinutím jsou vedeny axiálním vývrtem v hřídeli synchronního motoru.

Jednofázový střídavý měnič napětí budičů RBL byl řízen regulátorem NOCONTA, který byl vyráběn v ČKD Polovodiče. Nadřazený regulátor byl vyvinut v ČKD Elektrotechnice na stavebnici regulačního systému URS, ZPA Čakovice. Ten byl na dobu svého vzniku funkčně nadčasový. Tento regulační systém byl po roce 1986 nahrazen systémem ALMEZ, který byl plně vyvinut v ČKD Elektrotechnice, skládal se ze dvou regulačních van UCS 178 a UCS 186. Funkčně si tento systém zachoval vlastnosti systému starého, avšak byl realizován na moderní polovodičové technice.

Bezkontaktní budiče jsou budiče, které přenášejí budící výkon do rotoru synchronního stroje bezkontaktně - elektromagnetickým polem. V současné době je několik systémů bezkontaktního přenosu:

Rotační transformátor

Tento systém byl vyvinut v ČKD Elektrotechnice v počátku 80-tých let minulého století pod názvem RBL. Jednalo se o rotační stroj, který měl jednofázové axiální vinutí na statoru a stejně orientované vinutí na rotoru. Rotor byl navinut z izolovaných plechů, které byly také navinuty axiálně a v jednom místě radiálně přerušeny vzduchovou mezerou. Magnetický tok se uzavírá axiálně přes střední sloupek (rotor transformátoru) a dvě vzduchové mezery mezi jhem statoru a rotoru.

Stator rotačního transformátoru je napájen ze střídavého jednofázového regulátoru napětí. Ten je tvořen dvěma antiparalelně zapojenými tyristory.

Silový výstup rotorového vinutí rotačního transformátoru je vyveden přímo na rotační

ČKD Elektrotechnika dodávala s těmito budiči např. pomalootáčkové synchronní motory 2B 411-20H, 4 MW, 300 min^{-1} pro pohon pístových boxerkompresorů pro podzemní zásobník plynu v Dolních Dunajovicích (dnes innogy Gas Storage), synchronní motory pro pohony důlních ventilátorů o výkonech 2,5 MW – 3,25 MW, $2p = 10 - 14$ až po pohony turbo-kompresorů do výkonu 5 MW, $2p = 4$ ¹⁷. Střídavý napájecí proud těchto budičů se pohyboval od cca 60 A do 200 A.



Obrázek 17 - Synchronní motor 3,25 MW s budičem typu RBL

Vlastnosti, výhody a nevýhody budičů s rotačním transformátorem „RBL“

Vzhledem k tomu, že směr magnetického toku středním sloupkem (který rotuje) je axiální, není budící proud závislý na otáčkách stroje. Z tohoto důvodu je možno tento typ budiče montovat na stroje s rozdílným počtem pólových dvojic; jediným parametrem je potřebný budící výkon. To mělo velkou výhodu pro minimalizaci výrobních typů pro celé portfolio vyráběných synchronního motorů. Na dobu svého vzniku to byl převratný budící systém, který se nikde jinde na světě nevyráběl.

Velkou nevýhodou byla jeho konstrukční a výrobní náročnost. Jednalo se zvláště o výrobu rotorového svitku s vyfrézovanou (nemagnetickou) drážkou, který bylo nutné mechanicky zajistit tak, aby byl pevný a stabilní i při rotaci. Pro správný chod bylo nutné při montáži synchronního stroje zajistit vyrovnání vzduchových mezer mezi statorem a rotorem

¹⁷ TK důl Paskov, závod Staříč, důl Karviná, závod Lazy

transformátoru (velikost těchto mezer se pohybovala okolo 3mm) tak, aby byla zachována jejich dostatečná a bezpečná velikost i při tepelné dilataci rotoru synchronního stroje. To mnohdy montážní firmy nezvládaly a docházelo k haváriím těchto budičů vlivem axiálního zadření rotoru a statoru transformátoru.

Pravděpodobně díky výrobní náročnosti a nákladům přešla na konci 80-tých let ČKD Elektrotechnika, jako dominantní výrobce synchronních motorů střední výkonů, na rotační budiče typu SBM.

Pozn: V minulých letech jsme zaregistrovali zájem jedné tuzemské firmy o znovuoobnovení výroby těchto rotačních budičích zdrojů.

Rotační budiče typu SBM

Principem těchto rotačních budičů je „otočený“ synchronní alternátor s budícím vinutím na statoru stroje a třífázovým, rovnoměrně prostorově rozloženým vinutím na rotoru. Na rotoru, uvnitř vinutí, je umístěn třífázový rotační usměrňovač s přepětovou rotorovou ochranou, se stejnou funkcí, jako u výše popsaných budičů RBL.

Jmenovitý napájecí proud statoru budičů SBM se pohybuje okolo 15 A. Budiče SBM se vyráběly až do ukončení výroby elektrických strojů točivých v závodech ČKD (Nové Energo, Kompresory, Howden) Tento princip rotačních budičů používají i jiné světové firmy a je dnes považován za standard v oboru bezkontaktního buzení.



Obrázek 18 - Rotační budič SBM 1L171-08H2, Chemické závody Nováky

kontrolu a profylaktická měření. Nevýhodou je (oproti budičům RBL) závislost výstupního proudu na otáčkách. To nese sebou potřebu většího rozsahu typové řady budičů tak, aby byla pokryta celá řada vyráběných synchronních motorů. Značnou výhodou je malý řídicí proud těchto budičů (do cca 15 A), což snižuje nároky na výkonovou část napájecího zdroje pro

Konstrukce a výroba těchto budičů nenese žádná úskalí. Budič bývá namontován letmo na přední straně synchronního stroje a je, po odmontování předního krytu, dobře přístupný. Statorové pólové nástavce budícího vinutí jsou skládané z neizolovaných plechů a budící vinutí je vinuté z izolovaného Cu vodiče a poté nasazeno na pólový nástavec a vyklínováno. Stejně tak je dobře přístupný

i rotační usměrňovač, a to jak pro servis, tak pro

tento budič. Díky takto malému proudu je možno použít kromě řízených usměrňovačů třífázových i usměrňovače jednofázové, nebo usměrňovače tranzistorové.

3.2.4. Problémy spojené s provozem synchronních strojů

Hlavním a nosným problémem provozu synchronního motorů je rozběh a synchronizace rotoru s točivým polem statoru.

Záběrný moment synchronního motoru je závislý především na konstrukci rozběhového vinutí stroje (tzv. amortizéru). Díky jeho nevhodné konstrukci a konstrukci rotoru může být záběrný moment synchronních strojů nízký a zcela nesrovnatelný se záběrným momentem asynchronních motorů. Mnohdy bývá porovnatelný s protimomentem zátěžného stroje. V některých případech je urychlující moment stroje velmi nízký a někdy bohužel i nulový, nebo záporný. U pomaluběžných strojů pohánějící boxerkompresory je nutno před startem zvyšovat napájecí statorové napětí a to někdy až o 10% (Podzemní zásobníky Dolní Dunajovice a Tvrdonice, Chemopetrol Litvínov, Huta Katovice).

Na začátku 90-tých let byly v ČKD-E vyráběny vertikální synchronní stroje pohánějící odstředivá čerpadla pro právě rekonstruovanou čistírnu a úpravnu vody v Praze Podolí. Jednalo se o stroje o výkonu cca 1,5 MW. Jejich urychlující (záběrný) moment nebyl dostatečný. Ani po zvýšení napájecího napětí k limitní mezi (10%) nedošlo k úspěšnému rozběhu a muselo u nich dojít ke konstrukčním úpravám rotoru a vinutí amortizéru.

3.2.4.1. Konstrukce rotorového rozběhového vinutí – tzv. amortizéru



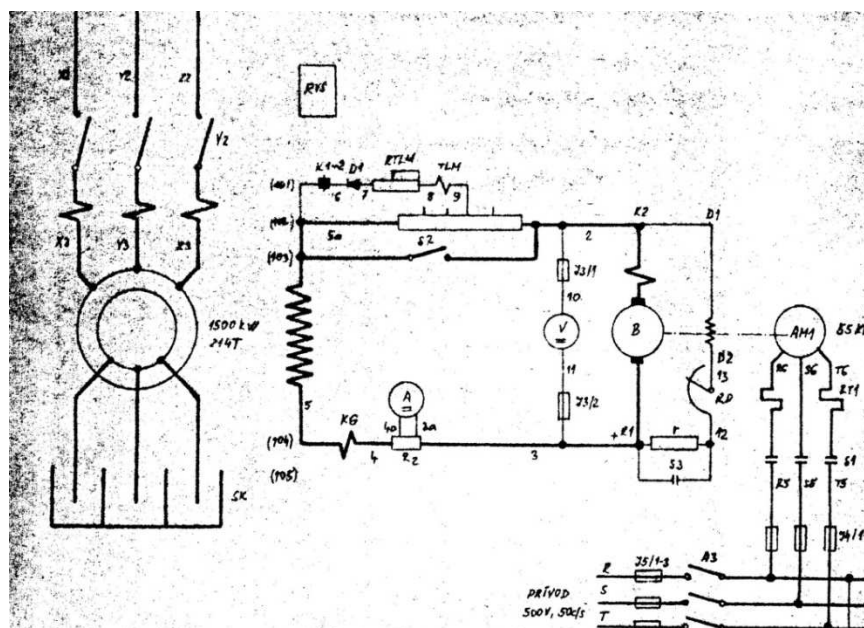
Obrázek 19 - Rotor synchronního motoru 3,2 MW, $2p = 8$, s detailem na amortizér s mezipólovými pružnými spojkami

Rotor synchronního stroje obsahuje, kromě budicího vinutí, ještě vinutí rozběhové, tzv. amortizér. Jedná se principiálně o vinutí nakrátko, které vytváří dodatečný rozběhový moment. Konstrukce amortizéru bývá různá. Skrze pólové nástavce (u vnějšího okraje nástavců) jsou montovány tyče (mosaz, Cu), které jsou na boku pólového nástavce spojeny měděným kruhem, nebo spojkami. Tyto spojky bývají (nemusí) propojeny mezipólově buď měděnými kruhy (rychloběžné stroje), nebo pružnými spojkami (mnohopólové stroje). Při rozběhu stroje se toto vinutí chová jako rozběhové asynchronní vinutí. Po synchronizaci se do vinutí již neindukuje žádný proud (nulová skluzová frekvence), vyjma přechodových stavů a tzv. kývání, kde amortizér příznivě působí svým momentem proti momentu (síle), která způsobila toto kývání. Proto se tomuto vinutí také někdy říká tlumící vinutí. Amortizér není dimenzován na trvalý provoz v asynchronním režimu, pouze na

dobu rozběhu synchronního motoru.

Při dlouhodobém chodu v asynchronním režimu dochází k přehřátí částí amortizéru a může dojít k vytavení a odtržení některých jeho částí a k destrukci motoru (statorového vinutí)¹⁸. Z tohoto důvodu ČSN-EN předepisují pro synchronní motory ochranu proti asynchronnímu chodu, nebo ochranu proti ztrátě buzení.

U soustrojí se synchronními motory s velmi těžkým rozběhem, jako jsou např. pohony kulových mlýnů v cementárnách, bylo do rotoru synchronního stroje vmontováno kromě amortizéru, třífázové asynchronní rozběhové vinutí, které bylo vyvedeno přes kroužky na rozběhový odpor. Rozběh synchronního motoru byl realizován pomocí tohoto asynchronního vinutí přes odporový spouštěč a při otáčkách blízkých synchronním došlo k synchronizaci (Cementárna Ladce). Schéma tohoto pohonu je na obr. č. 20.



Obrázek 20 - Schéma zapojení budícího a rozběhového vinutí synchronního pohonu 1 500 kW, 2p = 28 kulového mlýna v Cementárně Ladce

Pro omezení rozběhového statorového proudu jsou velké synchronní stroje spouštěny přes tlumivky zapojené po dobu rozběhu ve statoru, nebo rozběhový transformátor (méně časté). Oba způsoby rozběhu sniží napájecí napětí statoru po dobu rozběhu a tím i rozběhový proud. Tento způsob rozběhu srovnatelně sniží i záběrný moment stroje (moment je úměrný druhé mocnině statorového napětí) a tím značně prodlouží dobu rozběhu soustrojí. Proto

je použití tohoto druhu rozběhu omezeno pouze na pohony s velmi malým protimomentem v nulových otáčkách. Jedná se například o pohony důlních ventilátorů s kvadratickým zátěžným momentem, W-L soustrojí, nebo u pohonů turbokompresorů. Tímto způsobem rozběhu se prodlouží doba rozběhu soustrojí. Jsou časté případy doby rozběhů synchronních motorů, které trvají déle než jednu minutu.

Další možností rozběhu synchronních strojů je frekvenční rozběh, který byl realizován např. u již zmiňovaných pohonů kompresorů na tranzitním plynovodu (ventilové motory, 25 MW, 2p = 2, $n_{\max} = 3\,600$ (4 250) min^{-1} , nebo u důlních ventilátorů na dole Lazy (2 500 MW, 2p = 12, FM Siemens, 6 kV).

Firma PEG s.r.o., v které jsem zaměstnán, řešila v roce 2005 rozběh soustrojí rotačního měniče frekvence 16 2/3 Hz, 10 MVA na zkušebním okruhu trakčních vozidel v Cerhenicích.

¹⁸ Havárie synchronního motoru 4 MW v PZP Dolní Dunajovice v roce 1992

Z důvodu nízkého max. příkonu přívodní linky 110 kV nebylo možno realizovat žádný z výše zmiňovaných druhů rozběhů. Na společné hřídeli tohoto soustrojí jsou umístěny dva rotační stejnosměrné budiče, které byly nahrazeny budiči stacionárními. Tyto budiče byly použity jako pohonné motory pro soustrojí, jejich kotvy byly zapojeny do série a pomocí nich bylo soustrojí roztočeno na synchronní otáčky. Poté byl synchronní stroj nabuzen a jako generátor byl přifázován k napájecí síti. Celý tento proces je zautomatizován a probíhá bez zásahu obsluhy. Rozběh soustrojí, včetně nafázování, trvá cca 7 min.

Je nutné říci, že zásadní vliv na rozběhový moment má konstrukce rozběhového vinutí synchronního stroje. Způsob zapojení budícího obvodu synchronního motoru (dokrátko, přes odpor, nebo nulovou diodu má vliv až v otáčkách blízkých otáčkám synchronním. Problému rozběhu a následné synchronizace se budu podrobně věnovat v následující kapitole 3.2.5.

3.2.5. Synchronizace

[36], [33], [37] O problematice rozběhu soustrojí turbokompresoru, z pohledu vlastního kompresoru, bylo pojednáno v kapitole 3.1.3., nyní tento problém rozeberu z pohledu elektropohonu – synchronního motoru.

Synchronizace soustrojí je rozdílná podle typu rozběhu – velikosti protimomentu:

3.2.5.1. Soustrojí s lehkým rozběhem

Jsou to například důlní ventilátory, které se rozbíhají naprázdno, odlehčené a jejich protimoment je minimální. Jedná se o motory o výkonech 1,8 MW – 3,25 MW. Synchronní motory jsou pomalootáčkové, $2p = 10 - 14$, jsou osazeny valivými ložisky se stálou olejovou náplní. Jejich protimoment ve stojícím stavu je prakticky nulový (spojenými rotory lze otočit volně rukou). Rozběh je plynulý a trvá cca 5 – 8 s, v případě spouštění přes rozběhový reaktor (stroje nad 2,5 MW) je to cca 15 s. Po rozběhu se rotor zasynchronizuje samovolně, vlivem reluktančního momentu a remanentního magnetizmu - $m_{rs} > m_z$ (někdy se stane, že se zasynchronizuje posunutý o 180° el.). U pohonů tohoto typu není nutné vymýšlet sofistikovanou metodu synchronizace, stačí odčiasovat dobu rozběhu, komparovat efektivní hodnotu statorového proudu a provést odblokování regulátoru a nabuzení. Po nabuzení rotor vklouzne do synchronizmu pod správné pólové dvojice.

3.2.5.2. Soustrojí se středně těžkým rozběhem

Jedná se o pohony turbokompresorů, boxerkompresorů, dmychadel, čerpadel a další. Jsou to pohony většinou s kluznými ložisky a převodovkou (turbokompresory), kde je zapotřebí poměrně velký moment „na utržení“. Reluktanční moment je menší, než je moment zatěžovací - $m_{rs} < m_z$. Zde už je nutné věnovat větší pozornost návrhu obvodu buzení a s tím související konstrukce synchronního motoru. U motorů s rotory s kvalitním amortizérem a kruhy nakrátko vystačíme s přepětovou ochranou a nulovou diodou v obvodu. Opět potom stačí při rozběhu monitorovat statorový proud a při jeho poklesu a odčiasování provést nabuzení. Pokud však rotor synchronního motoru nemá amortizér, nebo pouze zjednodušený – viz obrázek č. 21¹⁹ - je vhodné (nutné) použít pro rozběh odpor v rotoru. Zmiňovaný motor,

¹⁹ Rotor synchronního motoru 32B 222-04HW1, v.č. 127659, 6 000 V, 1 250 kW, pohánějící turbokompresor v chemickém závodě Fortischem Nováky

měl momentová sedla, závislá na poloze rotoru vůči statoru, kde záběrný moment byl nižší, než protimoment, což mělo za následek, že se motor nerozeběhl, pokud se rotor zastavil v poloze s nulovým, nebo záporným urychlujícím momentem. Pro spuštění stroje bylo nutné zvýšit napětí na motoru až na 7 kV, což zase bylo nebezpečné pro motor (statorové vinutí).



Obrázek 21 - Rotor synchronního motoru 32B 222-04HW1 bez amortizéru

U tohoto stroje amortizér nahrazovaly pólové nástavce z kompaktního železa, které však nedokázaly vytvořit požadovaný záběrový moment. Přídavný moment od budícího vinutí s vřazeným odporem by proto znatelně zlepšil momentovou charakteristiku stroje.

3.2.5.3. *Stroje s těžkým rozběhem*

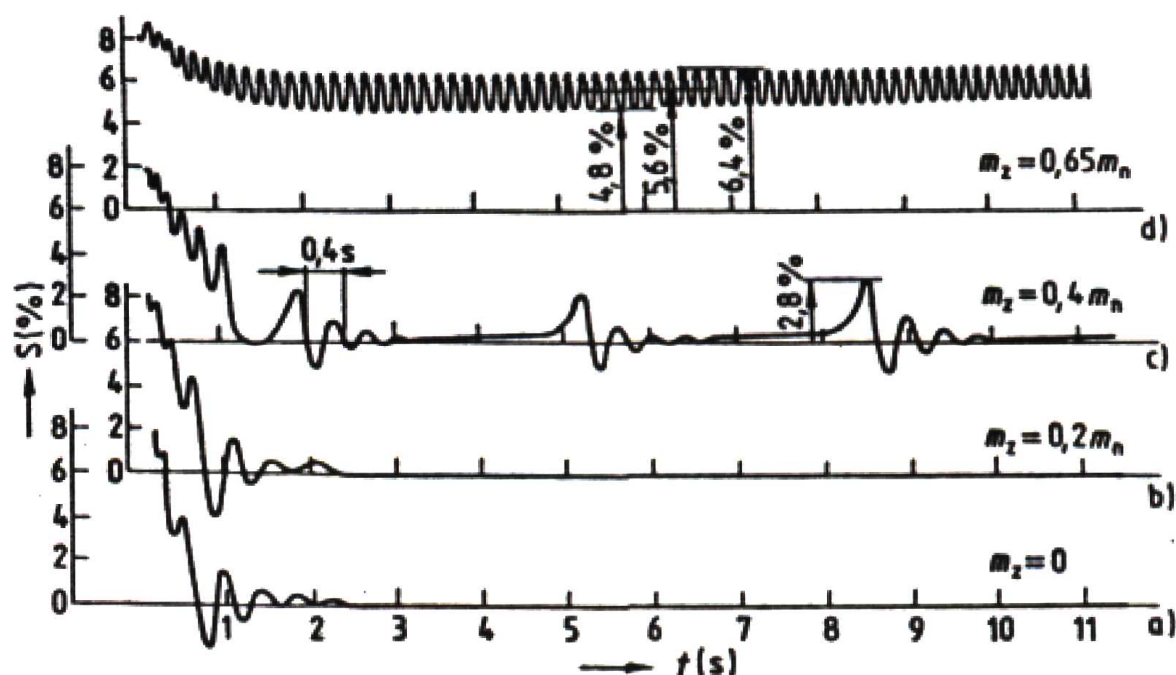
Velmi těžký rozběh mají například pohony kulových mlýnů, pohony pásových dopravníků a další pohony, u kterých nelze zaručit rozběh v odlehčeném stavu. U pohonů s velkým a předem nedefinovatelným protimomentem, však synchronizace provedená způsobem, jako u soustrojí s lehkým a středně těžkým rozběhem, nemusí být úspěšná.

U synchronního pohonu kulového mlýna cementárny Ladce jsem se setkal s tím, že úspěšná synchronizace stroje závisela na umu manipulanta, který podle proudu statoru synchronního stroje odvodil okamžik nabuzení; po nabuzení a ustálení statorového proudu pak snížil budící proud na jmenovitou (provozní) hodnotu. Doba rozběhu nebyla totiž nikdy stejná, byla velmi závislá na naplněnosti kulového mlýna, tzn., počátek nabuzení nebylo možno v žádném případě možno odvodit od času. Časování doby nabuzení samozřejmě není použitelný způsob rozběhu a synchronizace při takto těžkém rozběhu. Na tomto případu jsem chtěl demonstrovat

složitost tohoto problému.²⁰ Je to jedna z možných a vhodných funkcí nového mechatronického budiče.

V kapitole, kde popisují funkce nového systému buzení PEG xxx/ μ P7, uvádím případovou studii řešení takto těžkého rozběhu.

Na níže uvedeném obrázku č. 22 [38] jsou časové průběhy skluzu pro různé velikosti zátěžného momentu.



Obrázek 22 - Časová závislost skluzu s pro různé velikosti zátěžného momentu

Průběh a) a b) odpovídají soustrojím s lehkým rozběhem, c) se středně těžkým rozběhem a d) soustrojím s těžkým rozběhem. Podle průběhu a) a b) se rozbíhají např. soustrojí důlních ventilátorů a dmychadel v čistírnách odpadních vod. Vzhledem k tomu, že rotor synchronního motoru se může zasynchronizovat magneticky „opačně“, není nutné (a vhodné) zde odvozovat okamžik nabuzení od polohy rotoru vůči magnetickému poli statoru. Postačí okamžik nabuzení odčiasovat od okamžiku spuštění, nebo vykrácení rozběhového reaktoru.

Pohony turbokompresorů se rozbíhají v odlehčeném stavu, s částečně uzavřeným sáním a otevřenou antipompážní regulací, takže rozběh je většinou středně těžký, podle diagramu c). I zde většinou postačí odčiasování doby nabuzení, velmi přínosné je však sledování polohy rotoru vůči mg poli statoru a od toho odvodit počátek nabuzení. Zvolený způsob bude popsán v popisu navrženého budiče, kapitola 4.5.1.

²⁰ Řešení nabuzení s těžkým rozběhem pomocí technologického regulátoru nového budiče PEG xxx/ μ P7 bude popsáno v dalších kapitolách.

3.2.5.4. *Vliv zapojení rotorového obvodu při rozběhu synchronního motoru*

Rotorový obvod synchronního motoru se při rozběhu chová jako proudový zdroj, tzn., že vždy musí být uzavřen. Rotorovým obvodem při rozběhu protéká ustálený střídavý proud o frekvenci, rovnající se frekvenci skluzové. Pro přehled lze říci, že efektivní hodnota rotorového proudu při rozběhu stroje je řádově srovnatelná se střední hodnotou jmenovitého budícího proudu. Vzhledem k této skutečnosti a krátké době rozběhu (oteplení vinutí, kabelů, sběradel a dalších komponentů rotorového obvodu), není nutno tyto díly zvláště proudově dimenzovat s ohledem na rozběhové parametry.

Uzavření rotorového obvodu

Jak jsem již zmínil výše, vlivem velké vzduchové mezery má při rozběhu rotor synchronního motoru vlastnosti proudového zdroje. To znamená, že při jeho rozpojení by indukované napětí na svorkách rotoru vzrostlo na hodnotu, která by mohla znamenat destrukci rotorového vinutí. Změřil²¹ jsem indukované napětí do rotoru postupným zvyšováním napětí na statoru stroje se zabrzděným rotorem a na vývodech rotorového vinutí jsem sledoval indukované napětí. Napětí na statoru jsem zvyšoval až do 1,5 kV; na rotoru napětí lineárně stoupalo s převodem cca 2. Toto měření ukázalo, že není možné uzavření obvodu rotoru synchronního motoru při rozběhu podceňovat. Při rozpojeném obvodu by mohlo indukované napětí způsobit havárii rotorového vinutí, nebo značné poškození silové části budiče a dalších komponentů rotorového obvodu.

Dříve se pro buzení používala DC dynamo, většinou namontovaná na společné hřídeli se synchronním motorem. Kotva DC dynamo byla přímo připojená na budící vinutí synchronního stroje a zajišťovala bezpečné zkratování buzení po dobu rozběhu. Při přechodu na polovodičové budiče bylo nutné zajistit zkratování rotoru kontaktními přístroji; používaly se speciální stykače nebo tzv. CL vypínače.

V 80-tých letech minulého století se začaly u bezkontaktních budičů používat, zkratovací členy (které se nazývaly přepět'ové ochrany, protože okamžik zkratování odvozovaly od zvýšené hodnoty napětí na rotoru). Tyto zkratovací členy se osvědčily a začaly se používat i ve statických budících soupravách.

Přepět'ová ochrana rotoru synchronních strojů ČKD-E, UZP 211/217

Silovou část přepět'ové ochrany tvoří antiparalelní zapojení výkonového tyristoru a výkonové diody. Výkonová dioda je zapojená ve zpětném směru, tzn., že pracuje jako nulová dioda. O funkci nulové diody při rozběhu bude pojednáno dále.

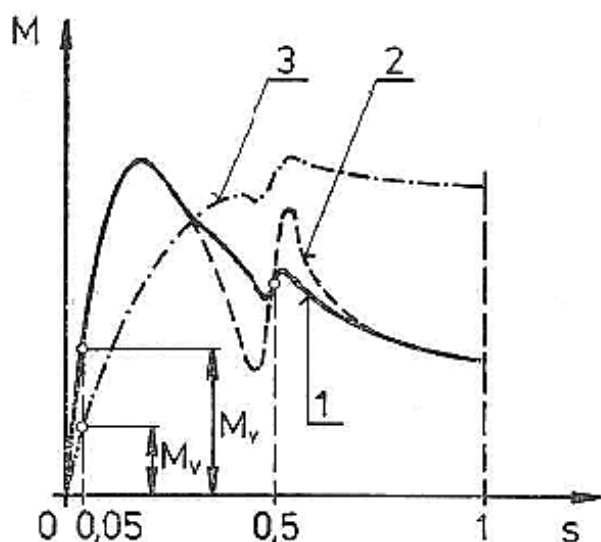
Tyristor, který zajistí zkratování rotorového obvodu v přímém směru, je řízen spoušť'ovým, komparačním obvodem, který vyše řídící impuls tyristoru. V okamžiku překročení nastaveného spínacího napětí na rotoru stroje tyristor sepne a je sepnut až do okamžiku změny polaroty proudu. Hodnota spínacího napětí byla nastavována na 700 V. Vyšší napětí by již mohlo způsobit poškození mezizávitové izolace rotoru synchronního stroje.

²¹ Měření bylo provedeno na synchronním motoru 3B 398-14H, v.č. 127 323, 6 000 V, 3,25 MW, v 7/1987 na zkušebně točivých strojů ČKD Elektrotechnika

Prvky rotorového obvodu, mající vliv na rozběh synchronního motoru

Rozebňový (urychlující) moment je součtem momentů, vznikajících v rotorovém budícím obvodu a momentu, vznikajícím v amortizéru a pólových nastavcích synchronního stroje. Přesný výpočet momentových poměrů synchronního stroje, daných kombinací amortizéru a budícího vinutí je velmi složitý, což konstatuje i G. N. Petrov. [32] „Než provádět komplikované výpočty se zanedbáním mnoha proměnných,...je vhodnější provést přibližný výpočet a vypočtené hodnoty korigovat podle zkušeností získaných z měření synchronních motorů s rotory srovnatelné konstrukce“.

Pokud má synchronní stroj robustní amortizér, skládající se z rotorových tyčí měděných, nebo mosazných a spojovací kruh, propojený spojkami mezi póly, je jeho moment, v porovnání



s momentem od budícího vinutí mnohem větší. Vliv momentu od budícího vinutí se v tomto případě projevuje až v konci rozběhu, při fázi synchronizace (nemá tedy smysl se zabývat členy, zapojenými v rotorovém obvodu). Pokud synchronní stroj nemá amortizér, nebo má amortizér, který vytváří malý moment je vliv amortizéru malý, pak jsou parametry rotorového obvodu důležité.

Pokud je vliv amortizéru malý a rozbíháme synchronní stroj s rotorem dokrátka, v momentové charakteristice se v cca 50% jmenovitých otáček výrazně projevuje tzv. Görgesovo sedlo [32] [34],

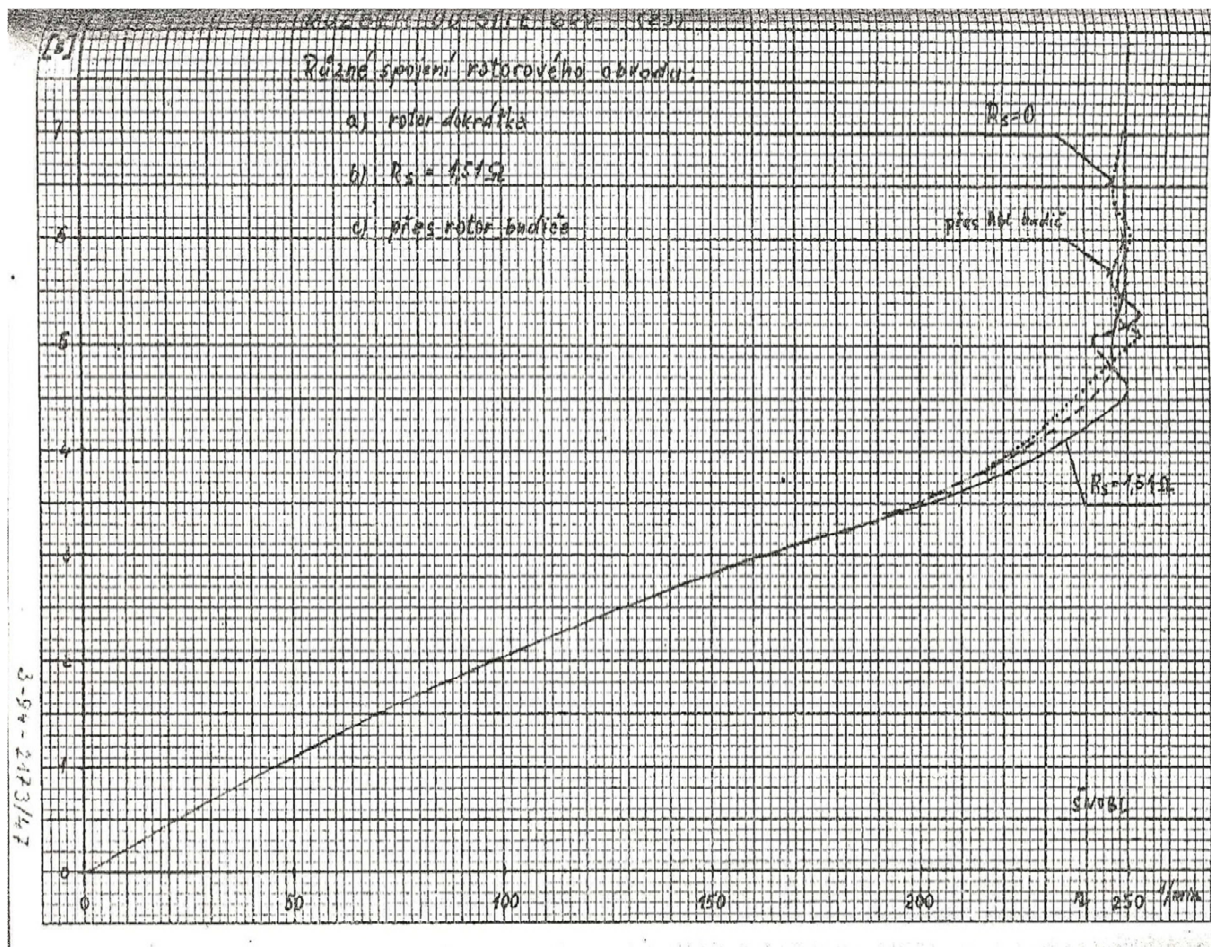
Obrázek 23 - Asynchronní charakteristika synchronního stroje s různým odporem rotorového obvodu

viz obrázek č. 23. [35] Průběh „1“ je pro rotorové vinutí s připojeným odporem, průběh „2“ pro rotorové vinutí zapojené dokrátka (zde je patrný vzrůst zákmitu momentu (Görgesovo sedlo) a průběh „3“ je se zapojeným odporem vysoké hodnoty.

Velmi zajímavý je vliv nulové diody v rotorovém obvodu. Tento vliv se může opravdu projevit až v poslední fázi rozběhu synchronního motoru – od cca 85-90% jmenovitých otáček. Do této doby musí být rotor zkratován. Při cca 5% skluzu je indukované napětí do rotoru již nízké, proto je možné zapojit do obvodu nulovou diodu (jedna půlperioada rotorového napětí je vykrácena).

V tomto případě je protékající rotorový proud jednosměrný a protéká ve směru budícího proudu a to v okamžiku, kdy je správná poloha pólů rotoru vůči orientaci magnetického pole statoru. To znamená, že v každé půlperiodě (jejíž délka odpovídá skluzové frekvenci) je rotor „přibuzováním“ od nulové diody vtahován do synchronizmu.

Bylo dokázáno v [37] a [38], že pokud je v obvodě budícího obvodu zapojena nulová dioda, dojde vždy k synchronizaci. Doba zasynchronizování je úměrná velikosti GD^2 soustrojí. Tím je dán velmi pozitivní vliv nulové diody v poslední fázi rozběhu, v okamžiku synchronizace.

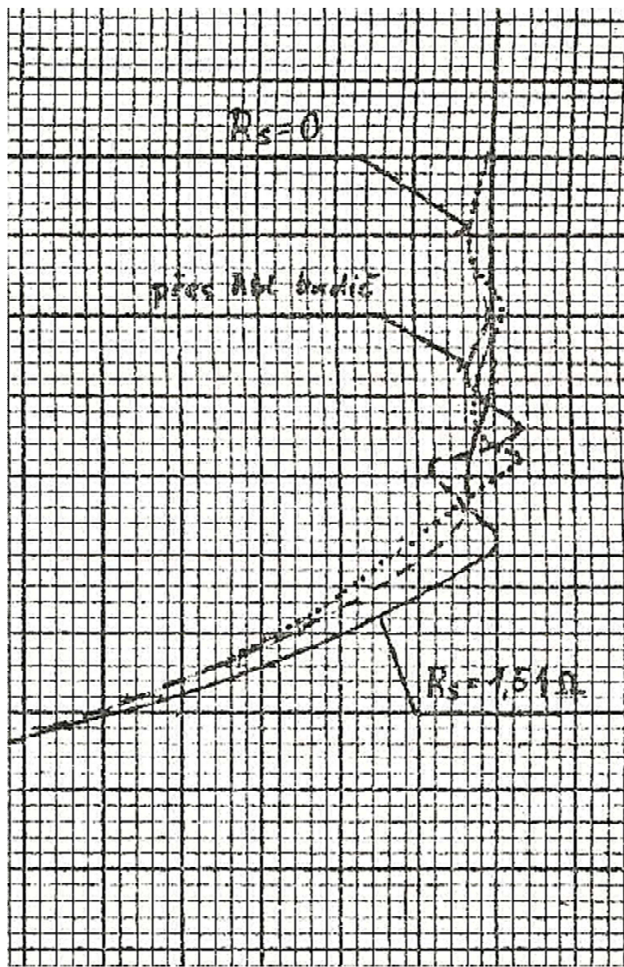


Obrázek 24 - Rozběhové charakteristiky motoru 2B 385-24H, v.č. 127 011, ČKD Elektrotechnika

Na výše uvedeném obrázku č. 24 [39] jsou zajímavé rozběhové charakteristiky, které byly naměřeny na pomalotáčkovém motoru 2B 385-24H, heslo²² Reforming SSSR v 80-tých letech minulého století [39]. Na stejném motoru a za stejných podmínek bylo provedeno měření rozběhových charakteristik s rotorem dokrátka, s odporem $1,51 \Omega$ a s připojeným budičem RBL (který nahradil nulovou diodu v rotoru). Je patrné, že do cca 80% otáček byl nárůst rychlosti otáčení shodný. V posledních 20% otáčkové charakteristiky se průběhy lišily. Na obrázku č. 25 je zvětšený detail synchronizace. Při zapojení odporu v rotorovém obvodu dosáhl rotor nejdříve synchronních otáček (projevil se tam kladně moment od rotorového vinutí), ale obtížněji se synchronizoval. Z obrázku je patrné „kývání“ okolo synchronních otáček. Při rozběhu s diodou v rotorovém obvodu bylo dosaženo synchronních otáček později, ale prakticky ihned došlo k synchronizaci (po prvním kyvu) přibuzením od nulové diody. Nejhuře dopadlo zapojení s rotorem dokrátka. V tomto případě bylo dosaženo synchronních

²² V ČKD Elektrotechnice dostávaly výrobní série elektrických strojů „hesla“, která odpovídala jednotlivým zákazníkům. Tato zvyklost se však velmi vžila a pracovníci ČKD znali tyto stroje více podle hesel, než podle typového označení.

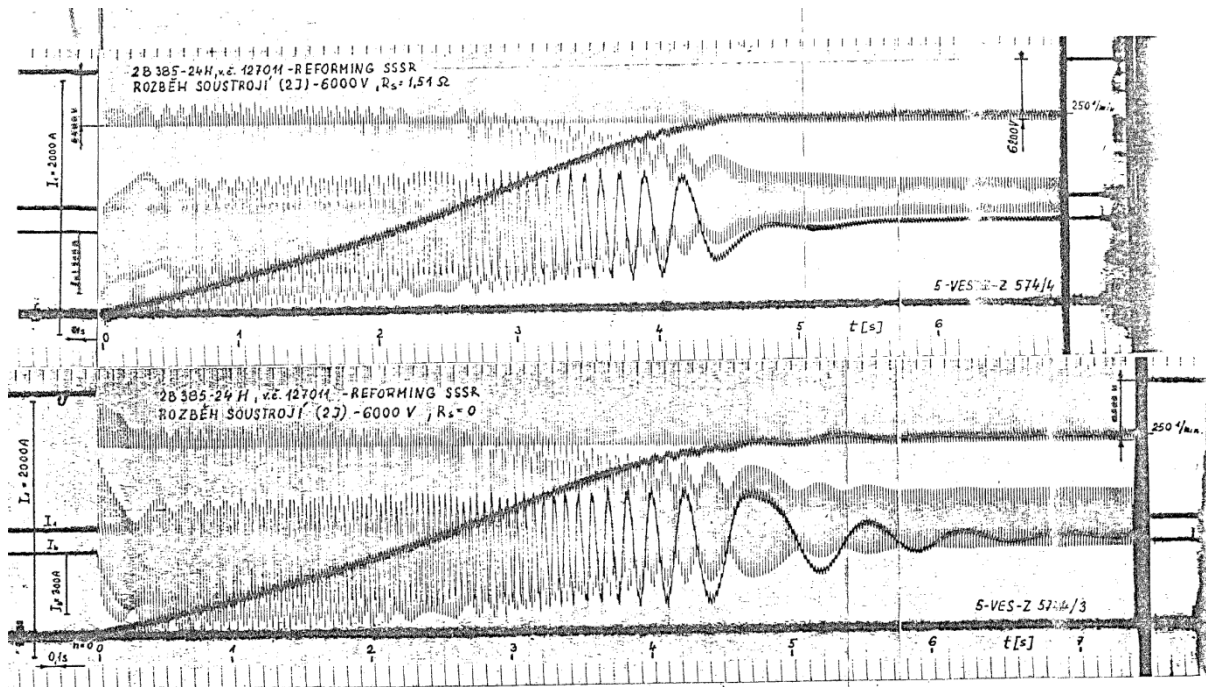
otáček nejpozději a také průběh rozběhu vykazoval největší kmity okolo synchronních otáček.



Na obrázku č. 26 [39] jsou průběhy proudu statoru a rotoru pro porovnání s rotorem dokrátka a vřazeným odporem. I zde je velmi patrná kratší doba rozběhu a rychlejší synchronizace.

Tento případ jsem záměrně uvedl, protože je málo možností porovnat vlivy zapojení na jednom stroji při shodných podmínkách. Ani při obrovských možnostech, které byly na zkušebně točivých strojů v ČKD Elektrotechnice v 80-tých letech minulého století se podobná měření již neopakovala.

Obrázek 25 - detail rozběhových charakteristik motoru 2B 385-24H, v.č. 127 011, ČKD Elektrotechnika



Obrázek 26 - Průběhy proudu statoru a proudů budícího okruhu s rotorem dokrátka a vřazeným odporem - motor 2B 385-24H, v.č. 127 011, ČKD Elektrotechnika

3.2.5.5. Synchronizace závěr

Problematika synchronizace je zásadním problémem provozu synchronních strojů a zabývalo se jím mnoho vědeckých výzkumů, prací a modelů. Problematika synchronních strojů je velmi široká, stroje se od sebe liší konstrukcí, výpočtem a návrhem magnetických obvodů a mnoha dalšími parametry. U málokterých výzkumů došlo k praktickému ověření, zůstává pouze u matematických modelů. U publikací, které jsou obecně a univerzálně použitelné (např. [37], [38]) jsou známy široké praktické zkušenosti autorů. Právě tyto publikace jsou dále v praxi velmi cenné pro vývoj zařízení, která mají být univerzálně použitelná pro co nejširší okruh zařízení.

Při vývoji budiče PEG xxx/ μ P7 jsem věnoval problému synchronizace značnou pozornost. Návrh algoritmů synchronizace budiče PEG xxx/ μ P7 bude popsán v kapitole 4.2.3., a 4.5.1.

3.2.6. Ochrany synchronních motorů – pohonů turbokompresorů

[13] Ochrany synchronního motoru musí být nezávislé na ostatních komponentech, a proto je není možno realizovat v systému řízení buzení, nebo v systému řízení TK. Je však možné pracovat s informacemi a to jak analogovými, tak digitálními, které mohou ochrany poskytnout. O této možnosti bude pojednáno v některé z dalších kapitol.

Základní požadavky na ochranu motorů jsou uvedeny v normě ČSN 33 3051 (333051) - Ochrany elektrických strojů a rozvodných zařízení [40]

Cílem bloku ochran je:

- ochránit motor před zničením, nebo havarijnými událostmi,
- v případě vzniku poruchy v nejkratší možné době zajistit jeho bezpečné odpojení od napájecí sítě a uvedení soustrojí do klidového stavu.

V dřívější době, cca do 90-tých let minulého století, byly používány systémy ochran, kde každá funkce měla vlastní ochranu a havarijní signalizaci. Soubor ochran proto obsahoval samostatnou nadproudovou ochranu, zkratovou, rozdílovou, napětíovou, asynchronní, tepelnou a další bloky dle specifiky pohonu a použití. Každá z těchto ochran měla výstupní relé s beznapětíovými kontakty, které se zapojovalo do bezpečnostního obvodu stroje (TRIP) a relé, jehož kontakt se využíval na signalizaci, většinou na poruchové tablo, později do různých ŘS.

V době velkého rozmachu a rozšíření mikroprocesorových aplikací se začaly jednotlivé funkce sdružovat do celků a vznikaly tak sdružené motorové ochrany, které poskytovaly stále větší uživatelský komfort a široký rozsah ochranných, řídicích, měřicích, monitorovacích a komunikačních funkcí.

3.2.6.1. Sdružené ochrany synchronních strojů

V současné době není problém ochrany synchronních strojů řešit diskretními ochranami pro jednotlivé ochranné funkce. V nabídce mnoha renomovaných výrobců jsou však sdružené ochrany, které zajišťují komfortní ochranu limit provozních stavů a mnoho dalších přidružených funkcí.

Jak jsem se již zmínil, tyto sdružené ochranné systémy, jak je možno dnešní ochrany nazývat, mají ve svém portfoliu všichni velcí světoví výrobci, jako je ABB, Siemens, Schneider Electric²³, Eaton²⁴ a mnoho dalších.

Pro vysvětlení možností a úrovně v současné době používaných ochran jsem použil vlastnosti ochrany řady MICOM P 24x, výrobce Schneider Electric, která je určena pro ochranu synchronních a asynchronních strojů. [41] [15] [42]

Následující přehled má zobrazit stručný výčet možných funkcí, které se samozřejmě mohou lišit dle vybraného typu a výrobce.

3.2.6.2. Vstupy měřených veličin

Ochrana má univerzální proudové vstupy pro MTP²⁵ s jmenovitým proudem sekundárního vinutí 1A, resp. 5 A, napěťové vstupy MTN²⁶ pro sekundární napětí 100V, resp. 100/V $\sqrt{3}$, dále vstupy pro měření teplot, ať již z čidel PT100, termočlánků, či termistorů. Dále ochrana má univerzální logické vstupy, které se využívají pro externí poruchové hlášky (termostaty a jiné poruchy), logické hlášky (poloha vn. vypínačů a technologické hlášky, které je možné v ochraně využít) a univerzální analogové vstupy.

3.2.6.3. Ochranné funkce

- Zkratová ochrana
- Diferenciální
- Zablokování rotoru
- Zpětný výkon
- Re-akcelerace
- Monitorování rozběhu/dlouhý rozběh
- Přepětí zpětné složky
- Ztráta synchronizace (asynchronní chod)
 - Tento ochranný článek se ukázal jako nespolehlivý a proto používáme diskrétní ochranu proti asynchronnímu chodu. Asynchronní chod patří k častým poruchám a následky dlouhodobého asynchronního chodu mohou být velmi závažné (viz dále)
- Ztráta zátěže
- Podproud
- Nesymetrie
- Vstupy přepínání rychlosti
- Zpětná rotace
- Fázová nadproudová
- Fázová směrová

²³ Bývalé ochrany Alstom a Areva

²⁴ Bývalé ochrany Moeller

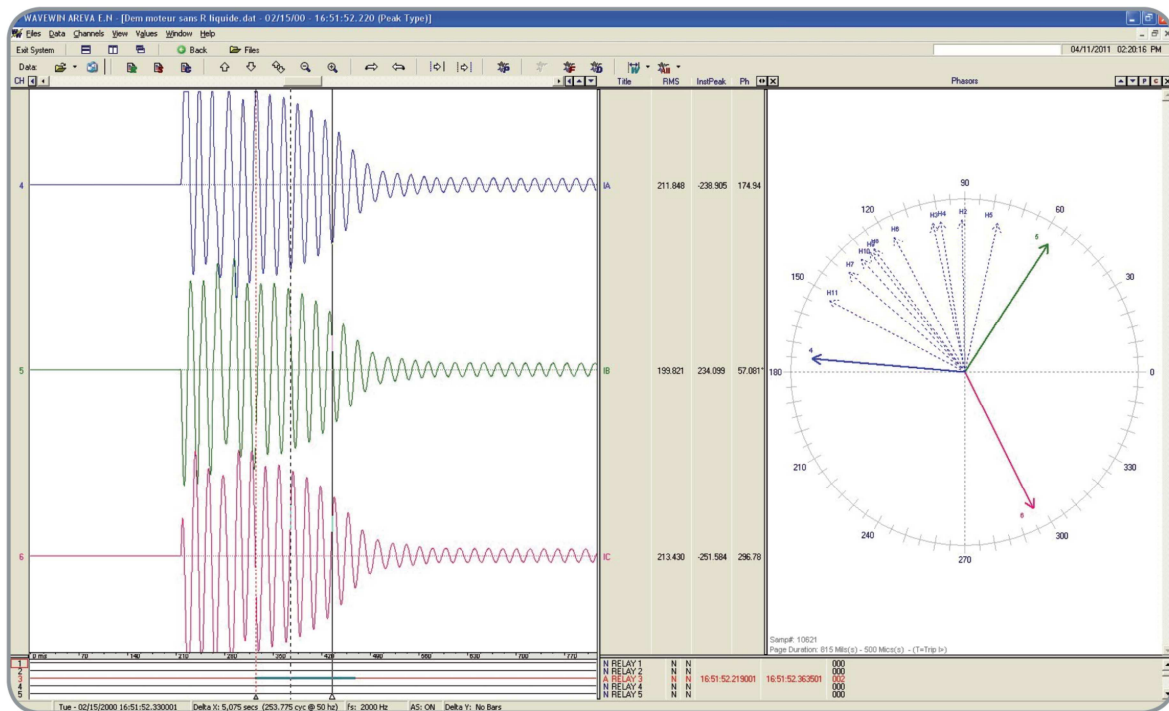
²⁵ Měřicí transformátory proudu

²⁶ Měřicí transformátory napětí

3.2.6.5. Záznamy o poruchách

Poruchový záznamník je velmi užitečná funkce, která umožňuje sledovat nejenom provozní údaje (průběhy měřených veličin), ale také identifikovat příčinu vzniku poruchy a lokalizovat její místo. Pomáhá také při nastavování a uvádění ochrany do provozu. Například lokalizace chybně zapojených proudových vstupů pro rozdílový článek je bez záznamníku poruch velmi zdlouhavá, většinou si vyžádá pečlivou kontrolu přírodních vedení proudových měničů, což je někdy komplikovaný a časově náročný úkol.

U zmiňované ochrany Micom P243 má interní záznamník poruch 8 analogových kanálů, 32 digitálních a 1 časový kanál. Data jsou odebírána 24krát za cyklus a typicky 20 záznamů o poruchách, z nichž každá trvá až 10,5 sekundy v energeticky nezávislé paměti. Všechny kanály a zdroj spouštění jsou uživatelsky konfigurovatelné. Na následujícím obrázku je zobrazený příklad znázornění vybraných průběhů proudu záznamníků poruch.



Obrázek 28- Záznamník poruch ochrany MICOM P241

3.2.6.6. Uživatelské rozhraní

Uživatelským rozhraním je grafický displej, kde jsou zobrazovány textové údaje (komunikační jazyk je volitelný, včetně češtiny), je možné naprogramovat i logické blokové schéma. Rozhraní obsahuje i ovládací tlačítka, pomocí nichž je možné měnit nastavení ochrany, sledovat poruchové hodnoty a další veličiny. Vzhledem k obrovskému množství nastavovacích prvků a programovým možnostem je však pro nastavování ochrany a vyčítání potřebných dat vhodné použít komunikační software.

3.2.6.7. *Komunikace*

Standardně je na čelním panelu k dispozici komunikační port pro místní přístup k ochraně. Volitelně lze přidat zadní komunikační port pro snadný přístup k nastavením, záznamům a měřením. K dispozici je i zadní komunikační port pro připojení k systémům SCADA. Pro tyto účely je k dispozici množství komunikačních protokolů (standardem je ModBus, dále např. Courier/K-Bus, ProfiBus a další). Pro vizualizaci a zobrazování v nadřazených systémech je možno, díky těmto komunikačním schopnostem, ochranu použít jako převodník analogových hodnot (proud stroje, napětí stroje, výkony a další.).

3.2.6.8. *Ovládací a komunikační software*

Dnes již samozřejmostí je komunikační a vizualizační software, který umožňuje komunikaci s ochranou, nastavovat parametry jednotlivých článků a programovat její funkce. Tyto činnosti lze provádět i z integrované klávesnice a displeje, ale vzhledem ke složitosti ochrany a by to bylo velmi zdoluhavé. Někteří výrobci tento software poskytují zdarma k ochraně (Schneider Electric), někteří software zpoplatňují, nebo podmiňují účastí na produktových školeních atp. (ABB)

3.2.6.9. *Ochrana proti asynchronnímu chodu.*

(Dříve také ochrana proti podbuzení stroje.)

Dlouhodobý asynchronní chod je pro synchronní stroje nepřijatelný stav. Většina synchronních motorů je konstruována pro asynchronní rozběh, tzn., že rozběhové vinutí synchronních strojů je na krátkodobý asynchronní chod konstruováno. Při asynchronním chodu bývá nejvíce namáháno rozběhové vinutí tzv. amortizér (o kterém bylo pojednáno již v předchozích kapitolách). Dlouhým asynchronním chodem může dojít např. k vyletování tyčí klece nakrátko, nebo k přehřátí a destrukci spojky (šroubů) částí amortizéru. Ty mohou následně poničit statorové vinutí synchronního motoru. V případě velkého činného zatížení stroje je statorové vinutí stroje namáháno proudem, který značně přesahuje hodnotu jmenovitého proudu. Některé motory však asynchronní chod vydrží dlouhodobě. Setkal jsem se s případem, kdy synchronní pohon ventilátoru na dole Dukla, OKR, 3 250kVA²⁷, pracoval, při poruše buzení, v asynchronním chodu cca 8 hod. Motor nebylo možno, z provozních důvodů, odstavit (ohrožení směny v dole), byl pouze snížen výkon na cca 1/3 P_n. Po odstavení stroje byla provedena revize rotoru a statorového vinutí a nebyly nalezeny žádné nepříznivé vlivy dlouhodobého asynchronního chodu.

Naproti tomu synchronní motor 4 000 kW, pohánějící pístový (boxerkompresor) kompresor č.2 v Podzemním zásobníku plynu firmy innogy Gas Storage, s.r.o., v Dolních Dunajovicích²⁸ zhavaroval po cca 30 s asynchronního chodu při cca 0,75 P_n vlivem přetavení spojky amortizéru a následnou destrukcí statorového vinutí.

Z výše uvedeného vyplývá, že synchronní stroje je nutné proti asynchronnímu chodu chránit.

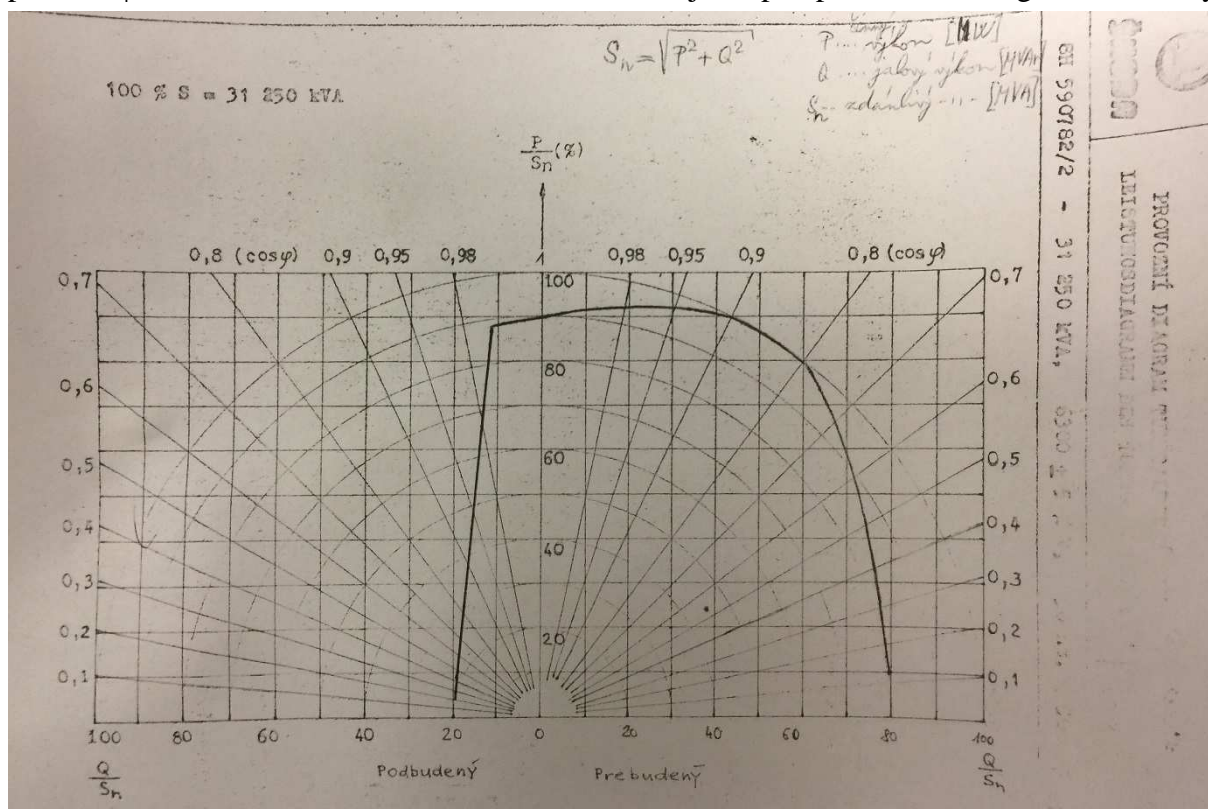
²⁷ Synchronní motor 3B 325-12HP1; v.č. 127 665; 3 250 kVA, 6 000 V; s bezkontaktním budičem RBL 5

²⁸ Synchronní motor 2B 411-20H; v.č.127505, 4 000 kW; 6 kV; 403 A; 300 min⁻¹; buzení 100 V; 275 A; chlazení IWC 37A71; krytí IP 44; 300 min⁻¹; buzení bezkroužkové; rotační budič RBL 5; 380 V; 170 A st.; 98 Vss; 275 Ass; chlazení IC 37, krytí IP 44, v.č. 127 509.

Dle staré (v současné době již neplatné) normy na ochranu synchronního stroje byla předepisována ochrana proti asynchronnímu chodu pro stroje nad 1 800 kW, do tohoto výkonu (1 800 kW) postačila ochrana ztráty budícího proudu (poklesu pod hodnotu minimálního budícího proudu). Dnes se však již ukazuje, že tato ochrana je nedostatečná a je nutné montovat ochrany, detekující asynchronní chod pro všechny synchronní stroje, bez ohledu na jejich výkon.

Asynchronní chod synchronního motoru

K asynchronnímu chodu synchronního motoru dochází samozřejmě při rozběhu stroje, kdy je motor připnut k napájecímu napětí buď přímo, nebo nepřímo přes rozběhový reaktor. Po dosažení otáček blízkých synchronním (a vykrácení rozběhového reaktoru) se motor nabudí a vtáhne do synchronismu. Tento stav je považován za provozní a motor je na tento stav konstruován. Při rozběhu stroje nesmí být rotorové vinutí otevřeno (musí být zkratováno, buď přímo, nebo přes odpor, či jiný člen, který omezí rotorové napětí, které se indukují při rozběhu do budícího vinutí)²⁹. K asynchronnímu chodu stroje může dojít za provozu v poruchových stavech při výpadku buzení, nebo při přetížení a nedostatečném nabuzení stroje. Při konstantním nabuzení stroje a zvyšování zatížení přechází stroj do induktivní (podbuzené) oblasti chodu. Induktivní účinek se dále snižuje až na mez stability stroje, která bývá, u strojů s vyniklými póly při $\cos \varphi$ nižším než 0,5 ind, u strojů s hladkým rotorem je to při $\cos \varphi$ nižším než 0,9 ind. Na obrázku č. 29 je kopie provozního diagramu stability



Obrázek 29 - Provozní diagram synchronního generátoru 31 MVA

²⁹ Tato problematika je rozebrána v kapitole 4.2.

synchronního generátoru 31 MVA³⁰. Zde je patrná mez stability v induktivní oblasti pod $\cos\phi = 0,99$, což prakticky vylučuje chod v podbuzeném stavu při jmenovitém zatížení³¹.

Pozn.: Tyto hodnoty jsou orientační a závisí na konstrukci stroje, v které oblasti a při jaké hodnotě induktivního účinníku dojde k prokluzu.

Při uvedených účinnících dochází k vytržení stroje ze synchronizmu a proklouznutí rotoru o jednu pólovou rozteč vůči točivému magnetickému poli statoru. Pokud nedojde ke zvýšení budícího proudu (např. vlivem funkce meze podbuzení budícího zdroje), nebo ke snížení výkonu zátěžného stroje, se tento jev cyklicky opakuje a dochází k asynchronnímu chodu motoru. Při asynchronním chodu dochází k prokluzu o pólovou rozteč (změna zátěžných úhlů) a následkem toho ke změně účinníku stroje. Z induktivní oblasti se prokluzem dostane stroj krátkodobě do oblasti kapacitní a poté opět od oblasti induktivní. Tyto změny se cyklicky opakují.

Tento chod stroje je provozně nepřijatelný, protože synchronní motory (rotory synchronních motorů) nejsou na dlouhý asynchronní chod konstruované. Do rozběhového a tlumícího vinutí, tzv. amortizéru se indukuje proud, na jehož dlouhodobé působení nejsou tato vinutí (většinou) konstruována. Při dlouhodobém asynchronním chodu dochází k přehřátí spojek amortizéru (někdy konstruovány jako šroubové, někdy jsou pájené). V případě jejich poškození může dojít odstředivou silou k jejich odtržení a poškození vinutí statoru, nebo jiných částí synchronního stroje (tento problém již byl diskutován na jiném místě).

Z výše uvedených důvodů je dlouhodobý asynchronní chod nepřijatelný a je nutno motor před tímto stavem chránit. Synchronní motory nízkých výkonů (do cca 1,8 MVA) se chránily proti poklesu budícího proudu komparátorem budícího proudu (dříve tzv. KG relé), který, v případě, že budící proud rotoru synchronního motoru poklesl pod nastavenou hodnotu, odstavoval motor. Tento systém ochrany byl sice jednoduchý a levný, ale nepostihoval všechny provozní stavy a byl zdrojem chybných hlášení a výpadků stroje. V některých případech mohl být motor v asynchronním chodu i při minimálním budícím proudu, naopak synchronní motor mohl být odstaven při nízkém buzení a malém zatížení zbytečně. Některé synchronní motory, většinou vícepólové, se udržely v synchronním chodu i bez buzení. Pohonné motory důlních ventilátorů se udržely v synchronním chodu bez buzení, cca do 25 - 30% jmenovitého zatížení.

Nad výkon 1,8 MVA bylo nutno již montovat ochrany proti asynchronnímu chodu, které spolehlivě detekují asynchronní chod a jsou schopny zajistit poruchové odstavení stroje.

Do 90-tých let minulého století se používaly ochrany proti asynchronnímu chodu typu D21M, které vyráběly ZPA Trutnov, dodnes je dostupná v sortimentu nabízených ochran firmy Dohnálek.

³⁰ Synchronní generátor typ 8H 590780/2; v.č. 051559; 31 250 kVA; 25 000 kW, $\cos\phi = 0,8$; 6 300V, 2 864 A; buzení 50 - 157 V; 255 - 660A, r.v. 1982; Škoda Plzeň, instalovaný v závodě Bukocel, Vranov n. T.

³¹ Provozní diagram na obr. č. 24 je k dispozici ve velínu elektrárny a obsluha jej trvale používá pro volbu provozního režimu generátoru.

[12] [13] Ochrana D21 je impedanční ochrana s kruhovou charakteristikou. Úkolem ochrany je vyhodnotit mez statické stability synchronního stroje s konstantním svorkovým napětím (tj. stav, kdy zátěžný úhel $\beta = 90^0$). Tento zátěžný úhel, převedený do impedanční roviny, je kružnice s průměrem rovným příčné reaktanci stroje v nasyceném stavu. Nastavovacím prvkem citlivosti ochrany je přepínač, kterým je možno nastavit tuto impedanci (poměrnou hodnotu příčné reaktance stroje v nasyceném stavu $X_{q\text{sat}}$ k jmenovité reaktanci synchronního stroje).

Hodnotu této impedance bylo obtížné zjistit, jediná dostupná možnost byla z prototypových měření, které byly prováděny na zkušebně výrobce převážně pouze u prvního vyrobeného kusu (nebo pokud si je vyžádal a zaplatil zákazník). Většinou však i tato zjištěná a nastavená hodnota provozně nevyhovovala a proto se musela hodnota nastavení ochrany upravit na základě provozních zkoušek ochrany s motorem.

Dalším problémem těchto ochrany bylo blokování ochrany po dobu rozběhu stroje a v případě přechodových stavů. To se provádělo externím časovým relé, které blokovalo výstupní TRIP signál, nebo odepínalo napájecí napětí ochrany.

Tyto ochrany vykazovaly poměrně vysokou poruchovost a byly velmi špatně kontrolovatelné (v porovnání s ostatními ochranami stroje, které bylo možno kontrolovat za klidu stroje). Z tohoto důvodu jsem, ještě za svého působení na zkušebně točivých strojů ČKD Elektrotechnika, zpracoval metodiku zkoušení těchto ochrany proti v přebuzené oblasti chodu stroje tak, aby je bylo možné zkoušet za chodu stroje bez havarijního odstavení pohonu. Tuto metodiku jsem vydal, jako interní zkušební předpis pro revizní techniky firmy BASTRO³². Díky tomu se zjistilo, že velké množství těchto ochrany bylo nefunkčních, ať již díky elektrické závadě, nebo chybnému zapojení.

Články ochrany proti asynchronnímu chodu obsahují i moderní sdružené motorové ochrany. Bohužel ne vždy tyto články pracují spolehlivě. Např. AREVA P243 [11] [41], chránící synchronní motor EBOE 350-30-20Z³³, obsahující ochrannou funkci „ztráta synchronizmu“ (článek 55) vykazovala v chodu soustrojí naprázdno hazardní stavy, které měly za následek bezdůvodné odstavení pohonu. Tyto hazardní stavy byly způsobeny kmity zátěžného úhlu stroje, způsobené značným kolísáním činné zátěže na hřídeli stroje, vlivem nerovnoměrného chodu pístů boxerkompresoru. Z tohoto důvodu nebylo možno uvedenou ochranu použít. Bylo nutno doplnit další ochranu, která tuto ochrannou funkci zajišťovala.

Stejný problém nastal i u ochrany obdobných pohonů s pomalootáčkovými synchronními stroji a boxerkompresory v závodě Chemopetrol Litvínov. Dle zkušeností kolegů revizních techniků tyto vlastnosti vykazují i některé ochrany jiných výrobců.

Vzhledem k velké nespolehlivosti a, dle mého, nevhodného způsobu vyhodnocení asynchronního chodu u řady sdružených ochrany, jsem navrhl novou ochranu proti asynchronnímu chodu. Typově jsem ji označil PEG 21MD [43]. Požadavky na její funkce a její popis je v kapitole 4.4.

³² Montážní a servisní firma pracující pro OKR, s.p., dnes OKD a.s.

³³ v.č.126 229, 4 000 kW, 6 kV, 405 A, 300 min⁻¹, buzení 90 V, 380 A, krytí IP 21b, 300 min⁻¹, pohánějí pístový boxerkompresor v závodě Podzemního zásobníku plynu - innody Gas Storage s.r.o. v Tvrdomicích

4. Analýza vlastností nového multifunkčního budícího systému pro řízení turbokompresorů

Cílem této disertační práce bylo navrhnout multifunkční systém buzení, jehož funkce mají přesah i do jiných oborů – především strojně technologických a řídicích. V dalších odstavcích zanalyzuji vlastnosti nově navrženého budiče, který byl v rámci této práce vyvinut, byl prototypově odzkoušen a aplikován v několika projektech.

Velká přidaná hodnota navrženého budícího systému je v jeho projekční a uživatelské variabilitě. Nejedná se o funkčně uzavřený systém, ale je možné jej konfigurovat a rozšiřovat dle technických požadavků projektu. Tuto vlastnost považuji za klíčovou. Systémy turbokompresorů jsou složité systémy a každý je určen pro jinou aplikaci, a tudíž jsou navzájem odlišné. Pokud chceme nový mechatronický budič implementovat do takovýchto rozdílných systémů, musíme mít k dispozici zařízení, které umožňuje přizpůsobit se požadovaným funkčním podmínkám a požadavkům.

Na toto navazují další podmínky, spojené s implementací těchto budičů. Asi nejdůležitější je technická a servisní podpora výrobce zařízení, kterou je nutné poskytnout od prvopočátku tvorby projektové dokumentace, přes montáž, zkoušky a uvádění do provozu, až po následný servis.

Nově navržený budič jsem typově označil PEG xxx/ μ P7, což značí sedmou generaci budičů, plně mikroprocesorově řízenou. Parametr xxx označuje jmenovitý proud budiče, PEG je název výrobce.

4.1. Budič PEG xxx/ μ P7

Budič kromě svých nastavbových funkcí zajišťuje samozřejmě i všechny funkce klasické. Vzhledem k vyspělejšímu HW regulační desky a špičkovému použitému řídicímu procesoru vyniká regulačními vlastnostmi předně při nízkých zatíženích a chodu naprázdno, kdy statorom synchronního stroje protékají velmi malé proudy, na hranici rozlišení použitých čidel. (Statorový proud při odlehčeném synchronním motoru a $\cos\varphi=1$ bývá cca 2-5% I_n , tzn., že sekundárním vinutím MTP protéká v tomto režimu 50-100 mA. Tento proud je již na hranici citlivost vstupních obvodů regulátoru a přesností je mimo třídu přesnosti MTP).

4.1.1. Základní regulační funkce

- Regulace na zadaný budící proud
 - Základní regulační smyčka a základní režim $I_b = \text{konst.}$, vyniká stabilitou a díky konstrukci a návrhu hardware i rychlostí
- Regulace na zadaný účinník motoru
 - Nadřazená regulační smyčka, která udržuje konstantní $\cos \varphi$ motoru, nezávisle na zatížení
- Regulace na konstantní jalový výkon
 - Nadřazená regulační smyčka, která udržuje konstantní dodávku jalové energie do napájecí sítě motoru

- Regulace na zadaný vzdálený účinník
 - Regulační smyčka, která udržuje konstantní $\cos \varphi$ ve vzdáleném napájecím uzlu (fakturačním místě). Podmínkou je, že motor má schopnost měnit v tomto místě účinník – je zapojen tak, že uzlem, ve kterém se reguluje, protéká činná i jalová energie synchronního motoru. Je možno přepínat mezi několika regulačními místy.
- Regulace na konstantní dodávku jalové energie ve vzdáleném měřeném bodu sítě
 - Regulační smyčka, která udržuje konstantní dodávku či odběr jalové energie v daném uzlu energetické sítě.
- Regulační meze a limity
 - Mez rotorového proudu – I_{bmin} a I_{bmax}
 - Mez statorového proudu – při dosažení a překročení jmenovité hodnoty proudu statoru dojde k odbuzování stroje a snižování jalové složky statorového proudu a tím i zdánlivého fázového proudu (proud statoru stroje), a to až do hodnoty $\cos \varphi = 1$, kdy je jalová složka nulová a statorový proud motoru je roven činnému. Pokud přetížení trvá i nadále, budič dává regulaci poháněného stroje signál ke snižování činného výkonu na hřídeli. Tato funkce vřazuje do procesu regulace i poháněný stroj.
 - Meze $\cos \varphi$ – $\cos \varphi_{min}$ a $\cos \varphi_{max}$
 - Mez podbuzení – stroj většinou nepracuje v podbuzeném stavu, tzn. v induktivní oblasti, kdy by mohlo dojít k výpadku stroje ze synchronizmu. Tato mez dokáže s velkou dynamikou zajistit přibuzení, při náhlé změně výkonu, nebo napěťového poklesu.
 -

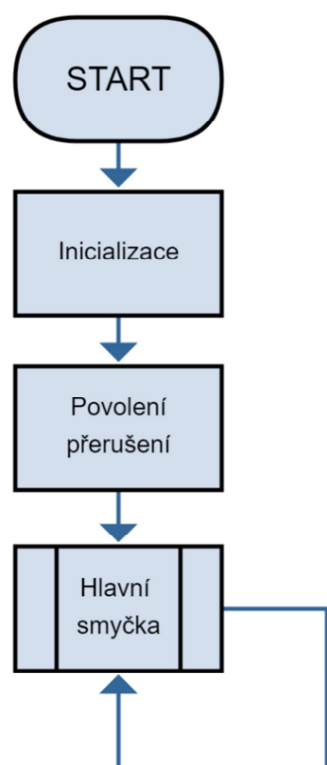
4.1.2. Software budiče – hierarchie regulace – vybrané bloky

Koncepce software

Software budiče je koncipován jako univerzální program, založený na funkčních blocích, které je možné na základě realizované aplikace zařazovat, vyřazovat a uživatelsky parametrizovat. Toto řešení umožňuje vysokou variabilitu tvorby výsledného programu, a současně zajišťuje využití odladěných sw bloků (např. regulátor, rampa, omezení, AD převod apod.), které je navíc v případě potřeby možné jednoduše upgradovat. V takovém případě se do aktuálního programu vloží upravená vyšší verze jednotlivého funkčního bloku, která byla předtím důkladně prověřena.

Software regulátoru nevyužívá operační systém. Hlavní smyčka programu je spouštěna cyklicky, nemá tedy konstantní periodu a je přerušována pouze obsluhou přerušení vyvolaného od dokončení AD převodů. AD převody trvají vždy konstantní dobu a jsou spuštěny periodicky v intervalu 100 μ s. Využitím pouze jednoho přerušení odpadá potřeba řešit priority obsluh přerušení a současně je zaručena přesná periodicitu výkonu funkcí spuštěných v obsluze jediného přerušení.

Program regulátoru pro procesor ADSP CM408F (Analog Devices) je kompletně vytvořen v jazyce ANSI C s využitím vývojového prostředí IAR ARM 7.6.



Obrázek 30 - Blokový diagram základní struktury programu

vizualizaci. Součástí hlavní smyčky jsou i rutiny obsluhující vlastní on-line diagnostický software vytvořený v prostředí JAVA, spuštěný na PC.

Obsluha přerušení od AD převodů

V jediném přerušení vyvolávaném periodicky od dokončení AD převodů s periodou 100 μ s, jsou řazeny funkční bloky programu, které je nutno spouštět s konstantní periodou. Vývojový diagram obsluhy přerušení je znázorněn na obrázku č. 31.

Po základním zpracování naměřených hodnot a obsluze softwarových čítačů a časovačů sloužících k čítání intervalů logických obsluh a k účelům rozkoků do méně často vykonávaných logických obsluh s pevnou periodou následuje blok synchronizace, sloužící k vyhodnocení střídavého signálu s kmitočtem blízkým síťovému. Blok synchronizace je podrobněji popsán níže v textu. Stejný blok je v programu využit jednak pro vyhodnocení střídavého signálu potřebného pro generování pulzů tyristorového měniče, jednak pro vyhodnocení změřených satorových veličin synchronního stroje, napětí a proudu. Výstupní referenční průběhy bloku synchronizace jsou dále použity v dalším bloku pro výpočet $\cos \varphi$, zdánlivého, činného a jalového výkonu.

Základní struktura programu

Po startu programu je provedena inicializace všech proměnných, do RAM paměti jsou z nonvolatilní paměti načteny parametry, jsou nastaveny periferie procesoru, povoleno přerušení od konce AD převodů a spuštěna hlavní smyčka programu.

Hlavní smyčka

Hlavní smyčka programu je spouštěna cyklicky na pozadí. Obsluhují se zde zejména různé komunikace, zejména ModBus, CAN, I2C a SPI. Dále je zde vyhodnocována většina logických funkcí, ať už uživatelsky-aplikačních, tak systémových. Je zde obvykle rovněž obsluha a výpočty hodnot pro nadřazený systém a

Po zjištění všech hodnot následuje blok zadání žádané hodnoty, kde se na základě aktuálního provozního režimu, zadaného způsobu řízení, případně dalších zadaných hodnot vygenerují žádané hodnoty $\cos \varphi$ resp. statorového napětí generátoru, případně žádaná hodnota budícího proudu.

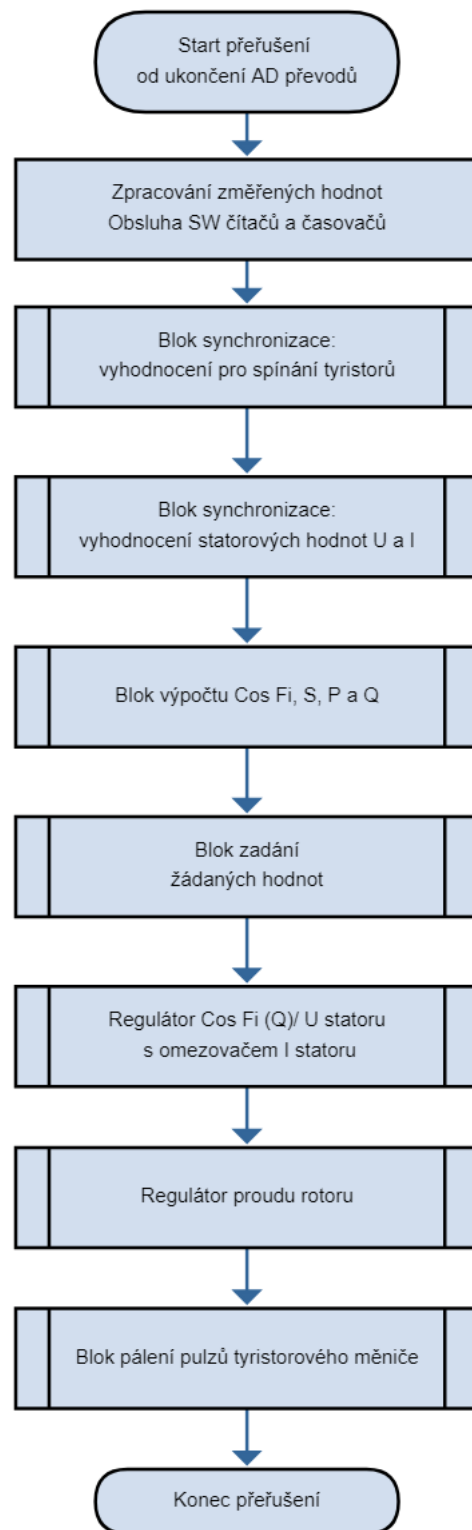
Následují bloky dvou sériově řazených PID regulátorů s dynamickými omezovači. Nadřazeným regulátorem je vždy regulátor $\cos \varphi$ (Q), resp. regulátor statorového napětí. O tom, která veličina bude regulována nadřazeným regulátorem, rozhoduje jednak aktuální stav stroje, a to zejména stav přifázováno/odfázováno a jednak zadaný režim regulace stroje.

Podřazeným (základním) regulátorem je PID regulátor budícího proudu, jehož výstupem je veličina úměrná žádanému výstupnímu napětí tyristorového měniče. Tato veličina je v bloku řízení „pálení“ (generování) pulzů linearizována funkcí \arccos a slouží dále jako řídicí veličina odpovídající řídicímu úhlu usměrňovače pro generování pulzů tyristorů (α).

Po ukončení obsluhy přerušeni program pokračuje vykonáváním rutin v hlavní smyčce programu.

Blok synchronizace

Blok synchronizace slouží pro zajištění generace referenčního pilovitého průběhu, který svojí periodou odpovídá aktuální periodě napětí v napájecí síti tyristorového měniče a současně je s tímto napětím pokud možno co nejlépe synchronizován. Tento referenční signál je v regulátoru dále používán zejména pro generování řídicích pulzů pro tyristory měniče. Blok synchronizace a výsledné referenční pilové průběhy jsou také využity pro určení fázového posunu mezi napětím a proudem ($\cos \varphi$).



Obrázek 31 - Vývojový diagram obsluhy přerušeni

Princip synchronizace

Obsluha bloku synchronizace běží v přerušení s periodou 100 μ s. Vstupní změřený signál napětí v síti je filtrován filtrem čtvrtého řádu, složeného ze čtyř sériově řazených filtrů prvního řádu (dolní propust). Zlomová frekvence těchto filtrů je nastavena na okamžitou změřenou frekvenci sítě (popis řešení měření frekvence bude uveden dále). Synchronizace je přitom schopna funkce v rozmezí frekvencí 20 až 70 Hz. Pro synchronizaci je využito faktu, že filtr čtvrtého řádu má pro zlomovou frekvenci, tedy pro první harmonickou snímaného signálu (která odpovídá síťové frekvenci) fázový posuv 180° elektrických. Výsledný signál po filtraci je tedy v protifázi vůči první harmonické měřeného průběhu. Velikost vyfiltrovaného signálu je přitom -12dB pro zlomovou frekvenci, tedy pro první harmonickou změřeného síťového napětí. Změřený signál je tak poměrně silně vyfiltrován, první harmonická je zeslabena cca 4x.

U vyfiltrovaného signálu jsou pak s periodou přerušení (100 μ s) snímány průchody nulou. Jsou vždy rozlišeny průchody z kladné hodnoty do záporné a ze záporné do kladné. V každém okamžiku průchodu nulou je zjišťováno, zda referenční pilový signál, realizovaný volně běžícím časovačem s periodou změřeného signálu, je s těmito detekovanými průchody nulou synchronizován. Pokud je z v okamžiku detekovaného průchodu nulou zjištěna odchylka, je korigován pilový průběh krátkodobou změnou periody buď odečtením neb přičtením určitého počtu vzorků (dáno parametrem) tak, aby se referenční pilový signál svými průchody nulou v další periodě přiblížil ke skutečně detekovaným průchodům nulou měřeného signálu. Změna periody při odchylce je přitom provedena vždy jen na jednu periodu referenčního síťového pilového signálu. V další periodě se vyhodnocení opakuje. Pokud již není zjištěna diference, je perioda pilového průběhu dána pouze změřenou periodou měřeného signálu. Tímto mechanismem je zajištěno, že korekce diference referenčního pilového průběhu oproti změřenému signálu je plynulá s krokem přesně definovaným parametrem. Hodnota tohoto parametru odpovídá času v násobcích 1.6 μ s, což je interval inkrementace pilového referenčního signálu. Tato hodnota je tak dostatečně jemná, aby zajistila stabilitu a přesnost synchronizace. Současně je efektem průměrování omezen vliv hrubší periody vyhodnocení AD převodu (100 μ s).

Pro správnou funkci popsaného mechanismu je třeba zajistit, abychom znali přesnou aktuální hodnotu periody měřeného signálu, respektive jeho vyfiltrovaného obrazu, a také abychom eliminovali stejnosměrnou složku měřeného signálu. Měření periody se provádí čítáním času mezi detekovanými průchody vyfiltrovaného signálu nulou s tím, že je opět porovnávána skutečná aktuálně změřená perioda určená změřeným rozdílem časů průchodů nulou a vyhodnocená referenční perioda. Vyhodnocená referenční perioda je opět průběžně korigována pomocí inkrementace/dekrementace konstantní hodnotou danou parametrem. Eliminovány jsou při tomto mechanismu změřené rozdíly časů průchodů nulou, které se liší od referenční periody o větší hodnotu, než která je nastavena parametrem. Jsou tak eliminovány chyby měření, nulový signál na vstupu, případně abnormální stavy na měřeném signálu. Referenční perioda je regulátorem také používána k výpočtu konstanty jednotlivých filtrů tvořících filtr čtvrtého řádu tak, aby zlomový kmitočet filtru odpovídal aktuální frekvenci měřeného signálu.

Průběžně se v bloku synchronizace vyhodnocují abnormality vstupního signálu, respektive chyby měření vstupního signálu. Dle nastavených parametrů je kontrolována maximální a

minimální povolená amplituda filtrovaného i nefiltrovaného změřeného signálu, povolená odchylka periody filtrovaného signálu, povolený rozdíl mezi kladnou a zápornou periodou filtrovaného signálu, povolená velikost stejnosměrné složky filtrovaného signálu. Při překročení těchto mezí se signalizuje porucha měření synchronizačního signálu. Referenční pilový signál je však stále generován s naposledy správně změřenými parametry po dobu nastavenou dalším parametrem a až po uplynutí tohoto času je signalizována havarijní porucha. Tento mezičas je využit k překlenutí krátkodobých abnormalit vstupního signálu, případně je běžící referenční pilový signál využit k řízenému vypnutí usměrňovače invertorovým chodem, což umožňuje rychlý pokles proudu v budícím vinutí. Pro zvýšení stability vyhodnocení abnormalit a chyb měření signálu je k nastavení signalizace bezvadného stavu signálu třeba, aby předtím proběhlo určité, parametrem nastavené, množství bezchybných period měřeného signálu, než bude tento vyhodnocen jako platný a dále použitelný v regulátoru.

Další nezbytnou podmínkou správné funkce synchronizace je eliminace stejnosměrné složky změřeného signálu. Stejnosměrná složka změřeného signálu může být způsobena nejenom přítomností stejnosměrné složky v měřeném signálu, ale také chybou měření nuly. Eliminace stejnosměrné složky je založena na korekci změřeného signálu o hodnotu ofsetu, který je vyhodnocován dynamicky po konci každé periody měřeného signálu. Jednotlivé měřené vzorky jsou integrovány po celou periodu měřeného signálu, a na základě polaritu výsledku integrace je dynamický ofset zmenšen nebo zvětšen o parametrem nastavenou hodnotu. Takto iteračně je ofset plynule upraven tak, aby byla stejnosměrná složka změřeného signálu nulová. Princip funkce opět zajišťuje eliminaci skokových změn a krátkodobých abnormalit měřeného signálu. Přitom je nastaven maximální povolený použitelný ofset a při jeho dosažení po delší dobu je indikováno varování, po další nastavené době je pak indikována porucha měření.

Blok vyhodnocení $\cos \varphi$

Princip vyhodnocení $\cos \varphi$ úzce souvisí s blokem synchronizace, který jsem popsal výše. $\cos \varphi$ je totiž vyhodnocován přímo z fázového posuvu změřených, silně vyfiltrovaných (filtr čtvrtého řádu) průběhů napětí a proudu statoru synchronního stroje. Vzhledem k dostatečné symetrii synchronních strojů vyšších výkonů, pro které je zařízení určeno, je $\cos \varphi$ vyhodnocován pouze z jednoho změřeného sdruženého napětí a ze změřeného proudu jedné fáze statoru synchronního stroje. Využito je obvykle sdružené napětí a fázový proud, jejichž fázory proti sobě mají fázový posuv 90° elektrických při $\cos \varphi = 1$. Tento fázový posuv je poté výpočetně korigován na nulu.

Při využití znalosti změřené periody signálů statorového proudu a napětí je možné fázový úhel v regulátoru reprezentovat jako čas, přesněji řečeno jako časový interval (časový posun) mezi referenčními pilovými průběhy změřených průběhů statorového napětí a proudu. Tyto referenční pilové průběhy jsou získány stejným způsobem jako referenční pilový signál pro synchronizaci popsaný dříve. Vyhodnocení je přitom opatřeno stejnými mechanismy eliminace chyb měření a abnormalit měřených signálů jako vyhodnocení synchronizačního napětí. Nastavení detekce chybových stavů je důležité zejména v případě měření statorového proudu, který může nabývat velmi malých (nulových) hodnot.

Vyhodnocení $\cos \varphi$ je přitom čtyřkvadrantové, tj. na základě toho, zda je signál proudu za napětím zpožděn, případně ho předstihuje. Dále se vyhodnocuje, zda jde o situaci, kdy je

jalový výkon synchronním strojem (synchronní stroj je považován za spotřebič - použita je spotřebičová konvence) odebírán (proud se zpožďuje za napětím – induktivní jalový výkon stroje) případně dodáván (proud předbíhá napětí – kapacitní jalový výkon stroje). To, zda se jedná o induktivní nebo kapacitní jalový výkon je čistě z důvodu konvence interpretováno znaménkem vyhodnoceného $\cos \varphi$. Kladný $\cos \varphi$ značí induktivní jalový výkon. Záporný $\cos \varphi$ značí kapacitní jalový výkon.

Zda se jedná o činný výkon synchronním strojem odebíraný nebo dodávaný je opět možné vyhodnotit na základě fázového, resp. časového posuvu mezi průběhy napětí a proudu. Pokud je posuv v absolutní hodnotě menší než 90° elektrických, jde o výkon synchronním strojem odebíraný (spotřebičová konvence), pokud jde o posuv větší než 90° (90° až 180°) elektrických, jde o činný výkon strojem dodávaný.

V případě vyhodnocení poruchy měření statorových veličin, ze kterých se vyhodnocuje $\cos \varphi$, zůstane synchronní stroj nabuzen na poslední předporuchový budící proud a stroj čeká na obnovení správného měření. To je důležité pro stabilitu stroje, zejména proto, že k indikaci poruchy měření $\cos \varphi$ dochází za provozu i z důvodu minimálního, případně prakticky nulového proudu statoru (stav odlehčeného stroje nabuzeného na $\cos \varphi = 1$).

Omezení statorového proudu stroje

Statorový proud nesmí překročit jmenovité hodnoty stroje. Při regulaci je tohoto dosaženo dynamickou úpravou mezí regulátoru $\cos \varphi$, který i nadále zůstává v činnosti. Standardně má regulátor nastaveny meze regulace $\cos \varphi$ dvěma parametry, minimem a maximem. Pokud však regulátor za provozu detekuje, že statorový proud dosáhl jmenovité hodnoty, začne plynule omezovat kladnou, případně zápornou mez regulátoru $\cos \varphi$, čímž dosáhne stavu, kdy je udržován maximálně jmenovitý proud statorem a přitom je dosaženo $\cos \varphi$, který se nejvíce blíží zadané hodnotě. Regulátor tak automaticky udržuje ideální možný stav stroje až do okamžiku, kdy by $\cos \varphi$ dosáhl hodnoty 1. Při dalším zvyšování činného výkonu stroje (přetížení) pak zapůsobí nadproudové, případně watové ochrany stroje. Funkce této limity bude dále probrána v kapitole 4.5.4.

4.1.3. Konstrukce regulační části

Řízení budičů PEG zajišťuje nově vyvinutá řídicí jednotka s označením PEG ReDex. Systém je založen na nejnovější řadě signálových procesorů ADSP-CM408 z produkce firmy Analog Devices. Tyto procesory jsou vybaveny jádrem ARM Cortex M4, umožňujícím díky standardním softwarovým knihovnám zrychlený vývoj a modifikaci uživatelských aplikací. Programovacím jazykem procesoru je ANSI C

Konstrukčně je řídicí systém pojat jako kompaktní modulární sendvičová sestava. Jádro systému použité ve všech aplikacích tvoří dvě karty: Procesorová karta a univerzální karta měření a přizpůsobení. Dle koncepce měniče, počtu a typu použitých výkonových polovodičových prvků (tranzistory/tyristory) se sestava doplňuje aplikačně specifickým modulem budičů výkonových prvků.

Pro možnost zajištění skutečné „multifunkčnosti“ budiče je kromě požadavků na snadnou a rychlou implementaci uživatelských funkcí nutné zajistit rozsáhlé možnosti propojení řídicího

systému s okolím. Systém ReDex je v tomto směru bohatě vybaven, standardně nabízí následující periferie:

- 32 x digitální vstup
- 32 x digitální výstup
- 16 x analogový vstup
- 4 x PT100/PT1000
- 4 x NTC/PTC
- 4 x analogový výstup $\pm 10V$, $\pm 5V$
- 4 x analogový výstup 0/4 – 20mA
- 1 x HART
- 1 x ETH
- 1 x RS 485
- 1 x RS 232
- 1 x CAN
- 1 x IRC
- 1 x Resolver
- 1 x PWM FAN output

Procesorová karta je vybavena systémem vzdálené správy, který umožňuje nepřetržitý monitoring zařízení v provozu. V případě poruchy může být okamžitě upozorněn dispečink firmy PEG, který pomocí podpůrných softwarových nástrojů analyzuje přenesené záznamy dat z okamžiku poruchy a usnadní tak rychlé a cílené odstranění poruchy. Pomocí vzdálené správy je také možné kdykoliv aktualizovat kompletní firmware budiče. Tímto způsobem je možné operativně reagovat na požadavky úpravy chování budiče, případně zvyšovat uživatelský komfort implementací nových funkcí.

4.1.4. Vizualizace provozních a poruchových stavů

K místní vizualizaci provozních, poruchových stavů a komunikaci s budičem se používá, stejně jako u předchozí generace barevný dotykový displej v základní velikosti 7“, výrobce Eaton, typ XV102 Tento typ displeje se osvědčil z hlediska spolehlivosti a životnosti, na rozdíl od displejů jiných typů a výrobců, které nezvládaly těžké podmínky průmyslového provozu. V případě požadavků projektanta, nebo provozovatele, je možno použít panel jiných, větších rozměrů.

Vizualizační panel má pět základních obrazovek – viz následující Obrázek 32

Obrazovka „Hodnoty“

Zde jsou zobrazovány aktuální provozní hodnoty stroje:

U motoru, I motoru, I_b , činný výkon P, jalový výkon Q, zdánlivý výkon S, $\cos \varphi$, časovač okamžiku nabuzení, zvolený pracovní režim, stav motoru (rozběh, chod, stop, motor připraven, odstaveno poruchou).

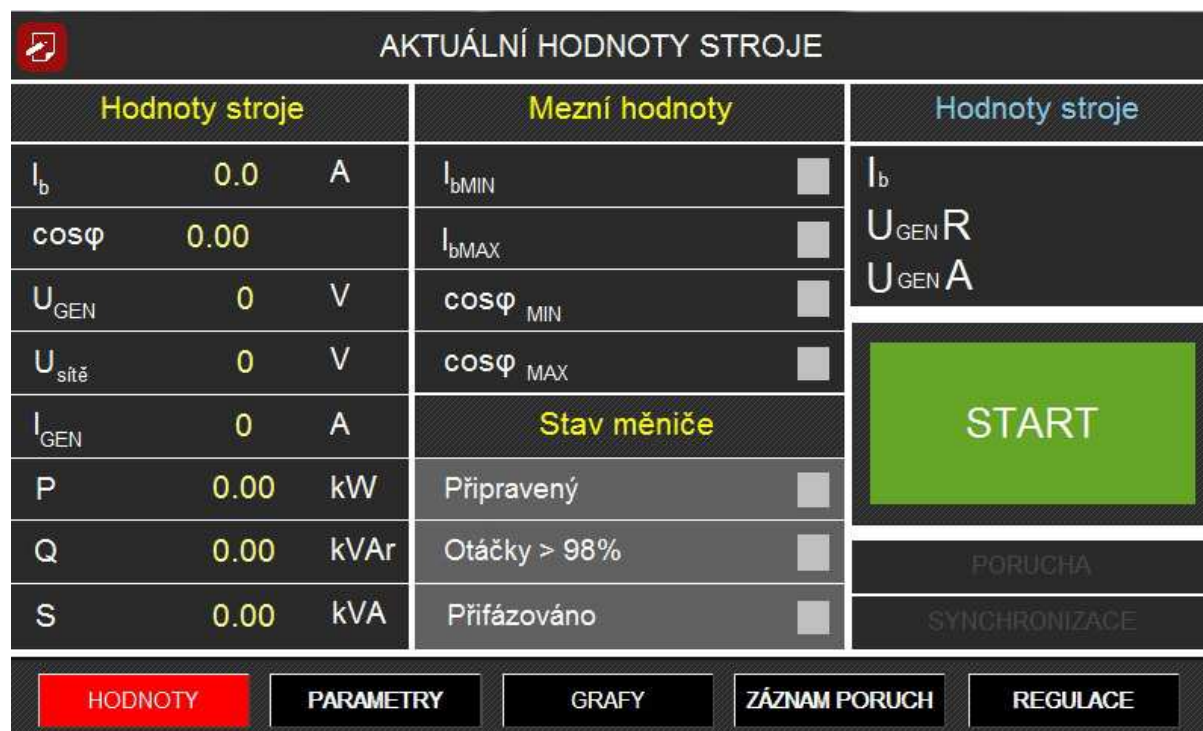
Dále jsou zde zobrazeny provozní logické (dvoupolohové) hodnoty:

Pracovní režim, stav hlavního vypínače motoru, dosažení limitů regulace a další uživatelsky zvolené veličiny.

Obrazovka „Parametry“

Zde jsou vizualizovány a je možno měnit nastavené limitní hodnoty, I_{bmax} , I_{bmin} , $\cos \varphi_{max}$, $\cos \varphi_{min}$, počáteční nastavení žádaných hodnot $\cos \varphi$, I_b , režim, způsob a doba nabuzení a další uživatelsky nastavené hodnoty.

Hodnoty nastavené při uvádění budiče do provozu a po zkouškách s pohonem lze měnit, jsou však chráněny dvouúrovňovým heslem (servis, vývoj).



Obrázek 32 - Úvodní obrazovka dotykového panelu statického budiče PEG xxx/uP7

Obrazovka „Grafy“

Zde je možné v zobrazení časového záznamu v grafické podobě sledovat průběhy měřených veličin stroje a dalších hodnot, tzn. I_b , I_m , U_m , P, Q, S, $\cos\phi$, a další uživatelsky navolené veličiny. Časový záznam má flexibilní časové měřítko, tzn. lze jej „zoomovat“. Časový záznam lze sledovat cca 1 měsíc zpětně. Velmi přínosná je tato funkce při zjišťování příčin výpadků stroje, poruch a dalších nestandardních stavů.

Obrazovka „Záznam poruch“

Zde je k dispozici kompletní poruchová logika, včetně historie poruch s časovými značkami. K dispozici jsou poruchy a výstrahy jednak vnější (asynchronní chod, přetížení, dosažení limit, další vnější poruchy ze zavedené vnější poruchové logiky), také však komfortní vnitřní diagnostika regulátoru, měniče a napájení. Díky této diagnostice je možno analyzovat zdroj případné poruchy a zajistit okamžitý servis.

Obrazovka „Regulace“

Na této obrazovce je možné měnit žádané hodnoty regulace, budící proud I_b , $\cos\phi$ motoru, $\cos\phi$ nadřazené soustavy (je možno přepínat více míst regulace), přepínat provozní režimy a místa regulace. Nastavování žádaných analogových hodnot je možné jednak z číselného pole (klávesnice dotykového displeje), nebo dotykovým tahovým potenciometrem. Možný je také způsob zadávání dálkovými povely „více“ a „méně“. Tato možnost zadávání žádané hodnoty je k dispozici pro retrofitové aplikace, kde je nahrazován budič s tímto způsobem

zadávaní a ovládání zůstává zachováno. Kromě možnosti zadávání žádaných hodnot jsou zde zobrazovány skutečné hodnoty zadávaných veličin v daných místech regulace. Z této obrazovky je možné zadávat i servisní funkce (po zadání hesla příslušné úrovně), jako je zkušební nabuzení do stojícího stroje atp.

Uživatelská obrazovka

Je připravena pro tvorbu uživatelských funkcí. Tato obrazovka je navržena na základě požadavků projektantů, techniků, či provozovatelů.

Jsou to:

- ovládání pomocných pohonů, a jejich řízení a vizualizace,
- ovládání spouštění a odstavení pohonu,
- hlídání mechanického stavu soustrojí a s tím související servis,
- funkce pro řízení výkonu turbokompresoru,
- antipompážní ochrana turbokompresoru,
- hlídání teplot systému.

Na uživatelské obrazovce mohou být zobrazeny stavové hodnoty, analogové hodnoty a technologická schémata s aktivními prvky, měnící se dle stavu zobrazovaných komponent.

Uživatelská obrazovka může mít tři sub-okna, tak, aby bylo možno zobrazované údaje logicky a přehledně sledovat.

Obsah informací, zobrazených na uživatelské obrazovce je možné (a také vhodné) řešit již ve fázi projektu, kde projektant definuje „co“ bude zobrazováno, ovládáno a měřeno. Budič bude již dodán s těmito naprogramovanými funkcemi.

Umístění vizualizačního panelu

Vizualizační panel je standardně umístěn na předních dveřích budící soupravy. Je však jej možno umístit i mimo budič, cca do 15 m vzdálenosti postačí propojovací datový kabel sběrnice RS 232, pro větší vzdálenosti, max. do 1 000m, je pak vizualizační displej připojen sběrnici RS 422. Výhodné je umístění displeje ve velínu technologie, nebo v místě ovládání synchronního motoru a turbokompresoru.

Komunikace budiče

Budič s okolními periferiemi komunikuje po datové sběrnici; standard je RS 485, protokol ModBus, možné jsou i jiné komunikační protokoly, např. ProfiBus, CAN a další.

Dnes již samozřejmostí je vzdálený přístup k parametrům buzení. Ten je využíván nejen ke vzdálenému ovládání a sledování provozu technologie, ale také ke vzdálenému dohledu a servisu. Díky vzdálenému přístupu je možné okamžitě identifikovat zdroj poruchy a to nejenom budiče, ale v celé technologii. Vzdáleně je možné také realizovat změny software na aktualizované verze, či provádět uživatelské změny (napří při změnách konfigurace ovládání technologie).

Přídavné a doplňkové funkce

Multifunkčnost nového budiče PEG xxx/ μ P7 spočívá v možnosti spolupráce s řízením poháněného zařízení (kompresoru, dmyhadla atp.), Tato komunikace je možná na několika úrovních:

- řízení rozběhu soustrojí a řízená a definovaná synchronizace na základě průběhů statorového a rotorového proudu,
- převodník analogových veličin motoru – svorkové napětí motoru, proud motoru, výkony, účinník, provozní stavy. Není potřeba znovu měřit a převádět tyto signály pro účely řízení zátěžného stroje, lze je jednoduše vyčíst pro komunikační sběrnici,
- sledování výkonových parametrů zátěžného stroje; v případě překročení jmenovitého výkonu na hřídeli synchronního motoru budič dává povel k odlehčení, v případě překročení hranice minimálního výkonu budič dává výstrahu o možné poruše na zátěžném stroji (např. porucha spojky),
- sledování vibrací soustrojí a predikce možných poruch, úprava budících hodnot v závislosti na vibracích,
- plánování servisu, pravidelných, středních a generálních oprav,
- sledování, řízení a kontrola pomocných pohonů soustrojí (olejová čerpadla, vodní pumpy, ventilátory atp.),
- monitoring teplot systému se signalizací limitních stavů. Každá hodnota má tři použitelné limity: min., max. výstraha a max. havárie,
- časový archiv naměřených analogových a logických hodnot, provozních, varovných a havarijních hlášek systému.

4.1.5. Konstrukce silové části

Konstrukce silové části se přizpůsobuje konstrukci synchronního motoru, konkrétně konstrukci budícího obvodu rotoru synchronního stroje.

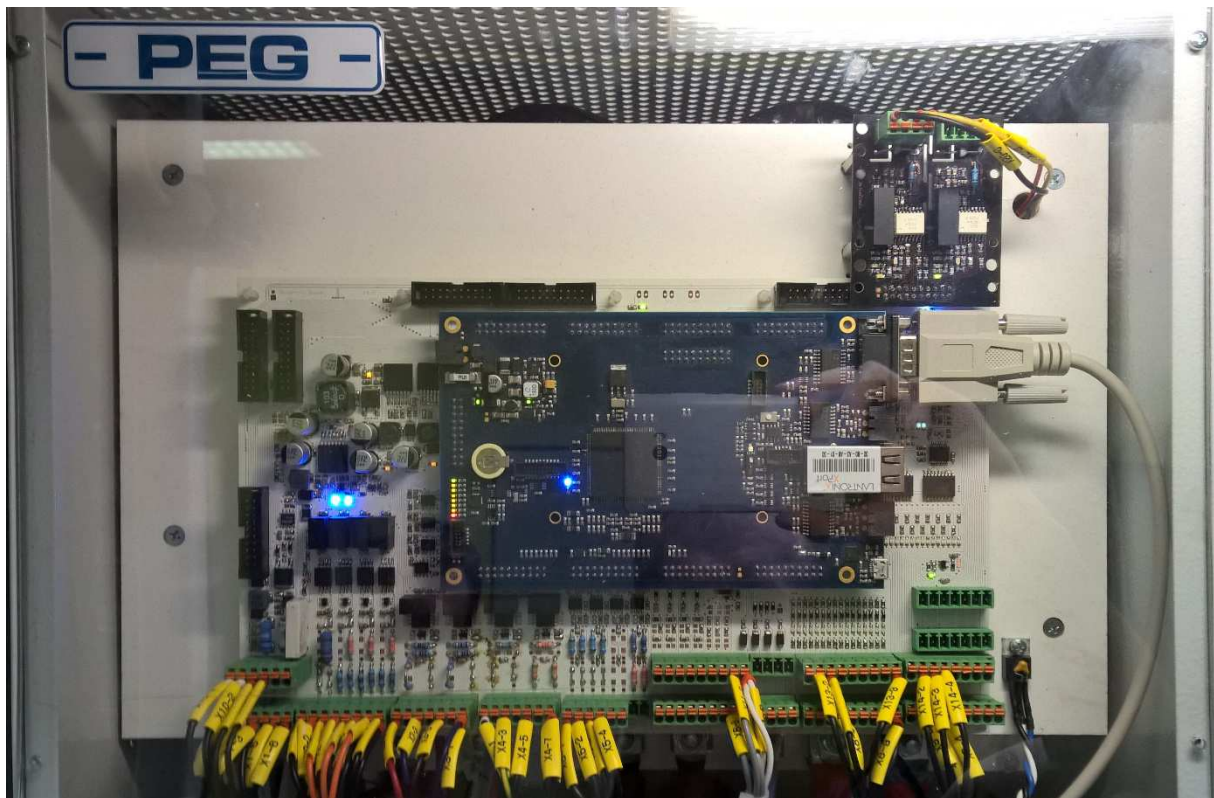
- Přenos budícího proudu přes kroužky

Budící DC proudy se pohybují v řádech desítek, až stovek ampér. Silová část je konstrukčně tvořena třífázovým tyristorovým můstkovým usměrňovačem, konstruovaným na bázi bezpotenciálových modulů (do $I_{bn} = 800$ A), nebo na bázi pastilkových tyristorů. Tyristorové prvky jsou umístěny na AL chladičích tvaru „Q“ (bezpotenciálové moduly) nebo na Al chladičích „M“ konstrukce (pastilkové tyristory). Tyristorový plně řízený můstkový usměrňovač je napájen z výkonového transformátoru. Silový napájecí transformátor musí mít dostatečnou napěťovou rezervu pro zajištění rychlé regulace proudu velké indukčnosti (indukčnost budícího vinutí synchronního stroje se pohybuje v řádu desetin, až jednotek H) a pro možnost krátkodobého přebuzení nad hodnotu jmenovitého proudu – tzv. forsírovku a přizpůsobuje napětí můstku pro optimální fázové řízení.

Rotor synchronního motoru je chráněn polovodičovou silovou přepětovou ochranou, která zajišťuje bezkontaktní zkratování rotoru při rozběhu a přechodných dějích, kdy se do rotoru synchronního stroje indukuje vysoké napětí (popis v kapitole 4.2.).

- Napájení pomocného budiče – nesené ventily – přenos budícího výkonu do rotoru synchronního motoru přes magnetické pole

Budící proudy se pohybují v řádu jednotek, max. desítek ampér. Silová část budiče je tvořena jednofázovým, resp. třífázovým můstkovým usměrňovačem, který je umístěn na AL chladiči s přirozeným chlazením. Můstek je napájen z transformátoru malého výkonu, který přizpůsobuje napětí můstku pro optimální fázové řízení.



Obrázek 33 - Blok budiče PEG xxx/ μ P7, pohled na regulační desku PEG ReDex

- Napájení budičů s rotačními transformátory s axiální vzduchovou mezerou – přenos budícího výkonu do rotoru synchronního motoru přes magnetické pole

Rotační transformátor je napájen AC proudem a řízen střídavým regulátorem napětí, který je tvořen antiparalelně zapojenými tyristory. Velikost budícího AC proudu se pohybuje v řádu desítek až stovek ampér. Tato silová část je napájena z vloženého vinutí ve statoru synchronního stroje, nebo je možno ji napájet ze sítě 230V, 50Hz. Pro galvanické oddělení budícího obvodu je vhodné použít oddělovací transformátor (není však nutností).

4.1.6. Mechanická konstrukce stacionárních budících souprav PEG xxx/ μ P7

Budící soupravy sedmé generace se umísťují do rozváděčové skříně o rozměrech 800 x 600 x 2000 + 100 (š x hl x v). Do celkového výkonu napájecího transformátoru 60 kVA je napájecí transformátor součástí skříně budiče, nad výkon 60 kVA se transformátor umísťuje vně rozváděčové skříně, do samostatného krytu o krytí IP42. Ztrátový výkon transformátorů na 60 kVA je již natolik velký, že by bylo obtížné ztrátové teplo z rozváděčové skříně odvést. V rozváděči je dále umístěno jištění přívodního napětí pro transformátor, jištění tyristorového můstku, spínací přístroj. Na dveřích rozváděč je umístěn dotykový displej, standardně o velikosti 7“, dle přání provozovatele může být libovolně velký.

4.2. Přepět'ová ochrana rotoru synchronního motoru

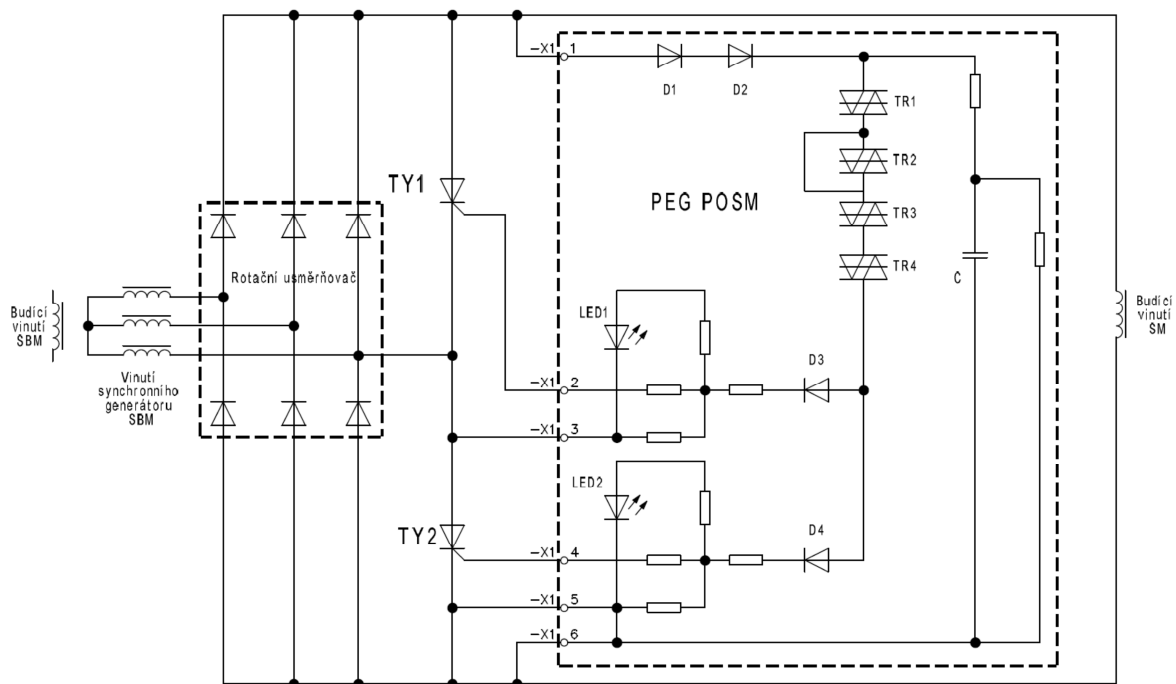
Jak již bylo popsáno výše, každý rotor synchronního motoru musí obsahovat zkratovací člen, který zajistí zkratování budícího vinutí po dobu rozběhu a při přechodných dějích.

Pro budící soustavu PEG xxx/ μ P7 byla navržen bezkontaktní spínač, který spíná při překročení napětí rotoru nad nastavenou mez. V kombinaci s nulovou diodou představuje důležitý člen, který usnadní rozběh a synchronizaci rotoru synchronního stroje.

4.2.1. Popis PEG POSM

Přepět'ovou ochranu PEG POSM tvoří silový tyristor, zapojení antiparalelně s nulovou diodou. U bezkontaktních budičů, které mají neřízený usměrňovač, je možné nulovou diodu nezapojovat – neřízený usměrňovač ji funkčně nahradí. Principiální schéma PEG POSM v zapojení s bezkontaktním budičem typu SBM je na Obrázek 34

Výkonový tyristor je orientován anodou na „+“ pól budiče. Řídící impuls pro tyristor zajišťují lavinové diody – trisily³⁴ TR1 – TR4, jejichž kombinací je nastaveno spínací napětí POSM. Sepnutí tyristoru je „vynucené“, do řídicí elektrody teče proud po takovou dobu, po kterou trvá přepětí. Po sepnutí tyristoru tento vede proud až do změny jeho polarity, kdy vedení přebírá nulová dioda. Jak jsem již zmínil v předchozích kapitolách, nulová dioda vede proud ve směru toku budícího proudu při napájení z budiče a ve správné poloze pólů magnetického pole. Tím vlastně přibuzuje vždy v definovaný čas a značným způsobem přispívá a urychluje synchronizaci.



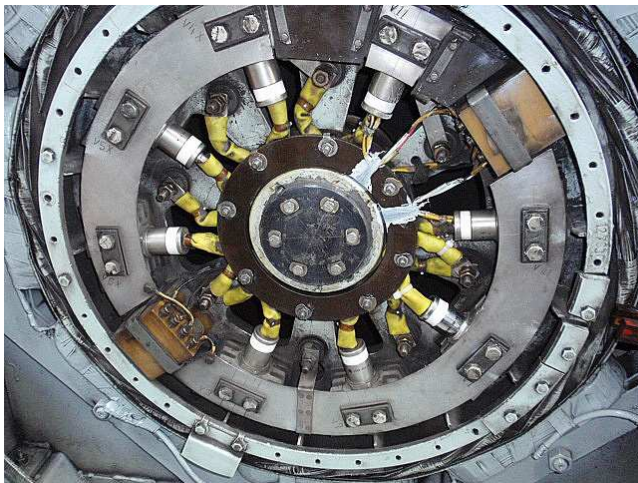
Obrázek 34 - Principiální zapojení POSM pro použití ve spojení s bezkontaktním budičem typu SBM

³⁴ Trisil je funkčně shodný s diakem, tzn. po dosažení limitního napětí se jeho impedance sníží prakticky na nulu, potom co klesne jeho proud pod určitou hodnotu, obnoví se jeho vysoká impedance - na rozdíl od transilu, který toto napětí drží (v podstatě jako zenerova dioda)

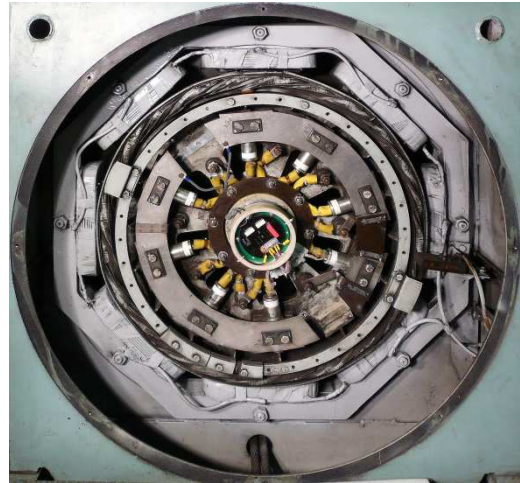
Řídicí deska POSM obsahuje obvody pro dva výkonové tyristory. Zapojení se dvěma tyristory se používá v rotačních budičích s jednofázovým³⁵, nebo třífázovým³⁶ neřízeným usměrňovačem [44] [35]. Pro jednofázové zapojení byly tyristory zapojené paralelně, u třífázového v sérii, s propojeným uzlem diod a tyristorů. Dvou-tyristorové zapojení se používalo definování komutace diod neřízeného usměrňovače. Použití dvou tyristorů paralelně u jednofázového usměrňovače nemělo z hlediska elektrotechnického smysl, používalo se z důvodu konstrukčního a mechanického (rovnoměrné rozložení prvků po obvodu rotačního kola).

V obvodech řídicích elektrod výkonových tyristorů jsou zapojeny LED diody (LED1 a LED2), které signalizují přítomnost zapínacích impulsů. To je velmi výhodné pro kontrolu POSM. Na LED diodách je možné sledovat správnou funkci POSM při každém rozběhu synchronního stroje – po dobu spínání ochrany, kontrolní LED diody signalizují. Kondenzátor „C“ tvaruje zapalovací impuls pro tyristor (tzv. „kostelíček“)

Pokud je to možné, u rotačních budičů umísťujeme POSM v axiálním směru na hřídeli tak, aby byly prvky POSM co nejméně namáhány odstředivou silou.



Obrázek 35 - Rotační budič ČKD-E, typ SBM 1L173-08 HW1 před výměnou POSM



Obrázek 36 - Rotační budič ČKD-E, typ SBM 1L173-08 HW1 po výměně POSM

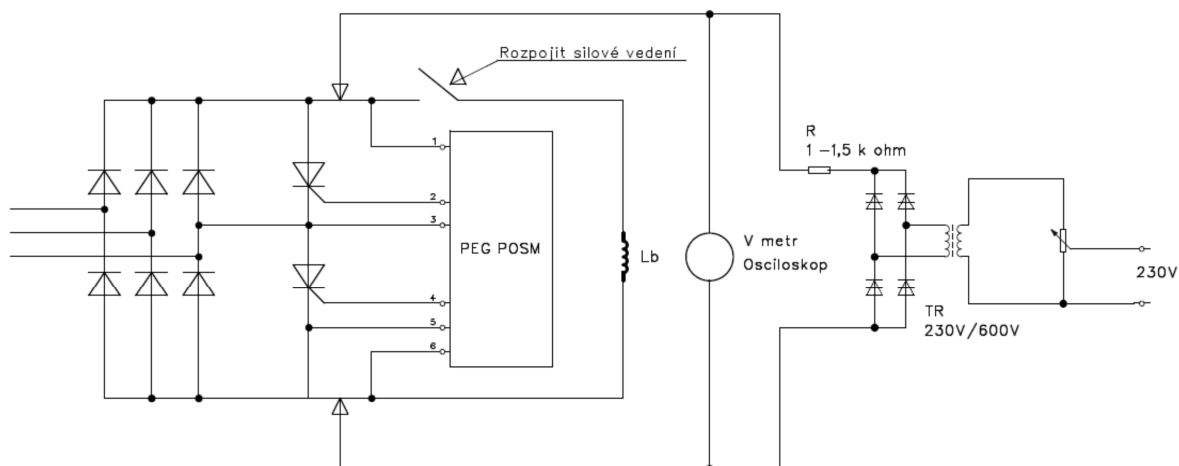
Na výše uvedených obrázcích č. Obrázek 35Obrázek 36 jsou pohledy na rotor bezkontaktního budiče typu 1L-173-08HW1 s původní přepětovou ochranou, která se skládala ze spoušťového obvodu a pulsních transformátorů (dvě hnědé kostky, umístěné na obvodu rotoru budiče) a rotor stejného budiče po rekonstrukci, s vyměněnou POSM. Na tomto obrázku je POSM namontována axiálně na volném konci hřídele rotačního budiče typu SBM, synchronního motoru 4,5 MW, který pohání turbokompresor na dole Paskov, jáma Staříč. LED diody jsou viditelné i při rotaci, kde se při rozběhu jeví jako svítící pásek.

³⁵ ČKD Elektrotechnika vyráběla tyto rotační budiče pod typovým označením RBL

³⁶ ČKD Elektrotechnika vyráběla tyto rotační budiče pod typovým označením SBM

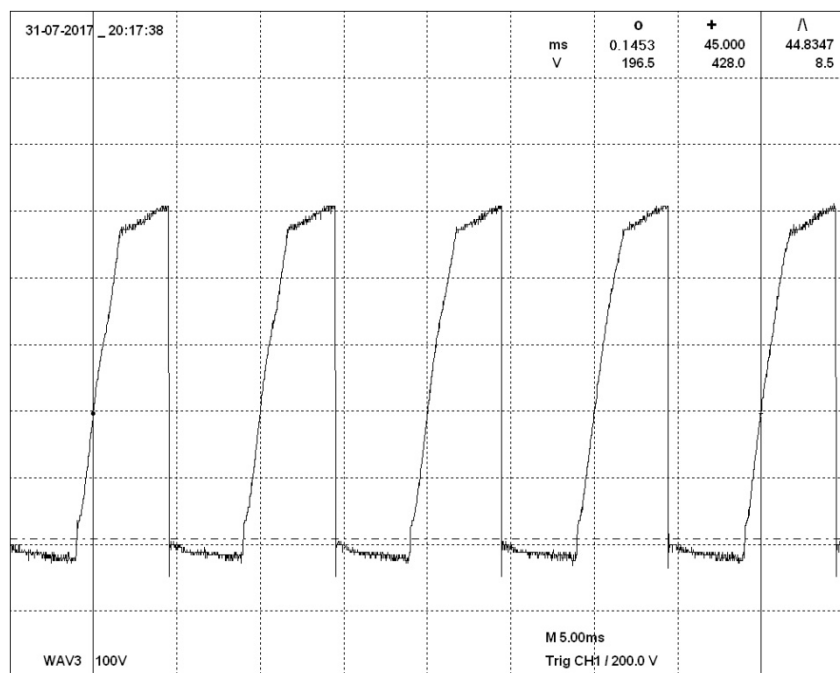
4.2.2. Hodnoty spínacích napětí POSM

Hodnota spínacího napětí POSM musí být vyšší, než je napětíová hladina napětí na rotoru při provozu. Ke jmenovitému budicímu napětí musíme uvažovat ještě maximální hodnotu napětíových špiček, které vznikají na rotoru vlivem komutací tyristorového, resp. diodového usměrňovače. Standardně, pro statické a rotační budiče se nastavuje hodnota spínacího napětí



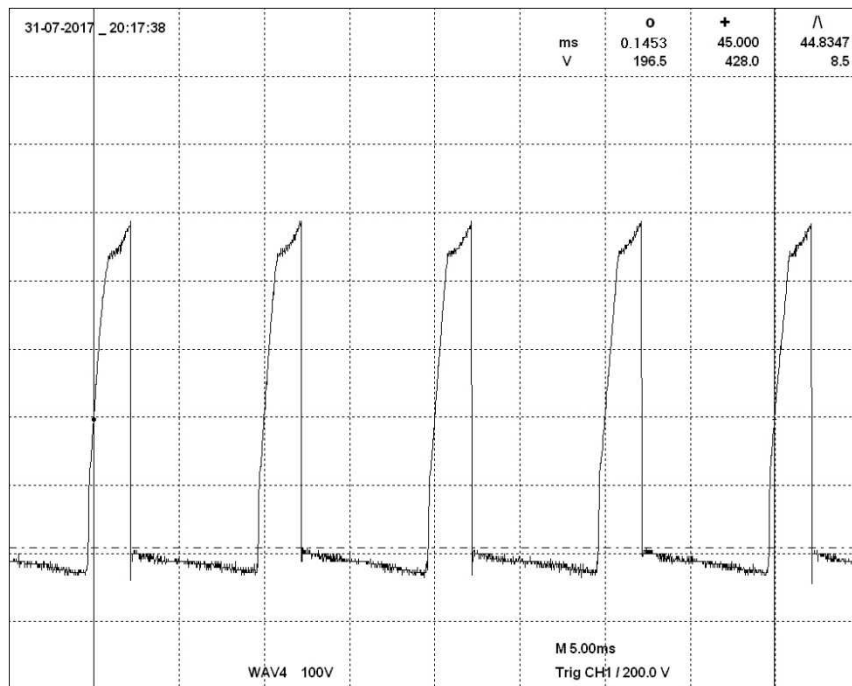
Obrázek 37 - Schéma zkušební přípravku na testování POSM

na 700 V, s možností jej snížit na 500 V (propoj na TR2, obr. č. 34). Některé aplikace však vyžadují nestandardní spínací napětí. Pro synchronní stroj s hladkým rotorem, který byl roztáčen přímým spuštěním k napájecí síti s vysokonapětovým softstartovým měničem bylo nutno zvolit spínací napětí okolo 200 V, pro generátory, které se vyrábějí v TES Vsetín, dodáváme POSM se spínacím napětím 950 V.



Obrázek 38 - Sepnutí POSM ve vrcholové hodnotě napětí

Pravidelná kontrola přepětíových ochran je velmi důležitá. V případě, že by ochrana nepracovala správně, mohlo by dojít k poruše budicího vinutí, nebo obvodů připojeného budiče. Z tohoto důvodu doporučuji kontrolu provádět při pravidelných revizích stroje, nejpozději však při ročních revizích. Pro kontrolu POSM jsem vypracoval zkušební předpis [45] a v nabídce příslušenství pro budiče PEG s.r.o. je zkušební přípravek (obr. č. 37).



Obrázek 39 - Průběh spínaného napětí při zvýšení zkušebního napětí

Pro zkoušení správné funkce POSM je nutné rozpojit silový obvod buzení. Regulovaným zdrojem napětí pomalu zvyšujeme DC usměrněné napětí až do hodnoty spínacího napětí POSM. Poté dojde k sepnutí, spínací hodnota se odečítá na připojeném osciloskopu. Na obrázku č. 38 je osciloskopický záznam průběhu usměrněného napětí ve chvíli sepnutí, tzn. ve vrcholové hodnotě

usměrněného průběhu. Spínací hodnota POSM

je v tomto případě 500V. Pokud zvyšujeme napětí dále, spínací hodnota zůstává stejná, prodlužuje se doba vedení tyristoru, zvyšuje strmost náběžné hrany a zkracuje se doba přítomnosti napětí. Tento stav je zobrazen na obrázku č. 39.

Pozn.: Zkreslení vrcholových hodnot (zlomy v průběhu napětí) jsou dány vlastnostmi zkušebního přípravku – napájecího zvyšovacího transformátoru.

4.2.3. Rozběh soustrojí s POSM

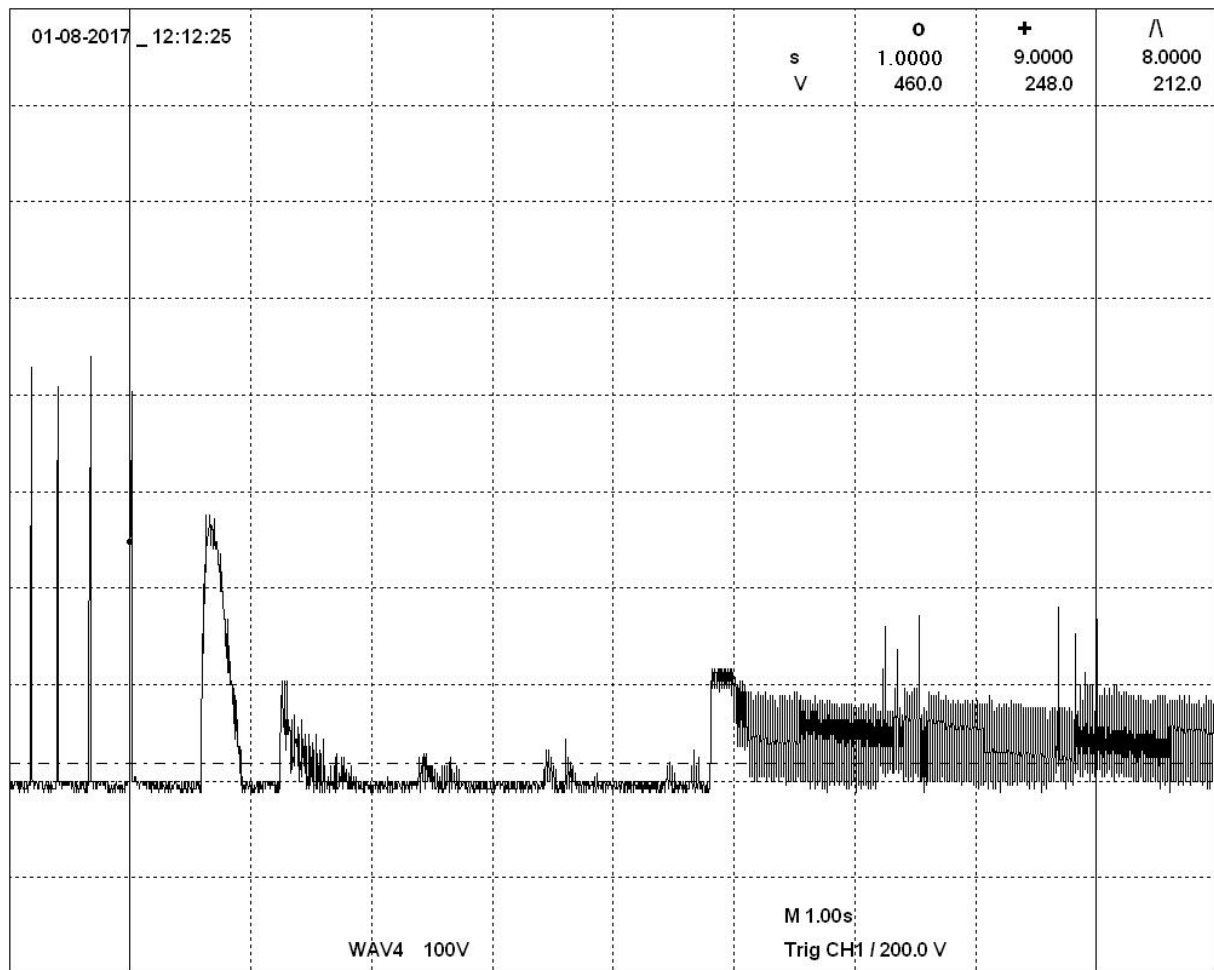
Na obrázku č. 40 je zobrazeno napětí rotorového obvodu při rozběhu synchronního motoru 4 MW³⁷, pohánějící boxerkompresor v závodě innogy Gas Storage, podzemního zásobníku Tvrdonice. Časové měřítko bylo zvoleno tak, aby byla zaznamenána poslední fáze rozběhu pohonu, včetně okamžiku nabuzení a synchronizace.

V obvodu rotoru synchronního motoru byla zapojena přepětová ochrana PEG POSM, s antiparalelně zapojeným tyristorem a nulovou diodou, proto napětíový průběh dosahuje pouze kladných hodnot (z pohledu polaritý budícího napětí).

Na počátku jsou zřetelné napětíové špičky omezené spínáním přepětové ochrany (amplituda napětíových špiček je 500 V (vrcholové napětí osciloskop nezaznamenal díky dlouhé časové základně a úzké napětíové špičce). Je patrné snižování skluzové frekvence, prodlužuje se interval mezi špičkami. Pátá špička již nedosáhla spínacího napětí přepětové ochrany, proto již tyristor nezapálil. V čase 5,8 s od počátku záznamu došlo k odblokování regulátoru a

³⁷ Synchronní motor EBOE 350-30-20Z, v.č.126 231, 4 000 kW, 6 kV, 405 A, 300 min⁻¹, buzení 90 V, 380 A, krytí IP 21b, 300 min-1, budič PEG 400/μP7, 400 A.

nabuzení stroje. Průběh napětí od tohoto okamžiku (od 6 s záznamu) je průběhem napětí na šestipulsním řízeném usměrňovači při ustáleném budícím proudu.



Obrázek 40 - Oscilogram rozběhu synchronního stroje s POSM a nulovou diodou

Napětí v rozmezí 5,8 s – 6 s dosáhlo maximální hodnoty. Regulátor, pro dosažení žádané hodnoty budícího proudu, otevřel můstek na plné napětí (průběh neřízeného usměrňovače). V čase 6 došlo k dosažení žádané hodnoty budícího proudu zaregulování tyristorového můstku. Dále průběh odpovídá průběhu napětí na plně řízeném můstku.

Zajímavé jsou napěťové špičky v čase 7,2 s; 7,5 s; 8,7 s a 8,9 s. Tyto napěťové špičky jsou způsobeny jiskřením na uhlíkách sběracích kroužků. Motor byl spouštěn po půlroční odstávce, a proto kroužky mohly být znečištěné mastnotou a uhlíky, po pravidelné výměně nezaběhnuté.

Z šířky impulzů napětí (strmosti nárůstu napětí) do sepnutí přepěťové ochrany (první čtyři špičky) je patrná velikost indukovaného napětí do rotoru synchronního motoru při rozběhu a velké skluzové frekvenci. Díky této velké strmosti nárůstu indukovaného rotorového napětí dU_r/dt digitální osciloskop nezaznamenal vrcholové hodnoty napěťových špiček, které jsou 500 V (potvrzeno jinými měřeními a zkouškami)

Znázorněný průběh je typickým průběhem nabuzení nejenom pohonů s boxerkompresory, ale i turbokompresory. U turbokompresoru bývá však podstatně delší doba rozběhu. Ve

znázorněném případě byla doba rozběhu (doba do okamžiku odblokování regulátoru buzení a nabuzení) 14 s, v případě turbokompresorů s rozběhem přes rozběhový reaktor (většina pohonů) bývá tento čas okolo 40 s, v některých případech i přes 1 min. Tak dlouhé časy rozběhu jsou již extrémem, je nadměrně zatěžován amortizér stroje nadproudem a je proto nutné zvážit přepočítání rozběhové tlumivky a zkrácení rozběhové doby.

Tyto rozběhy je možné hodnotit jako středně těžké, u kterých není nutné odvozovat okamžik nabuzení od polohy rotoru vůči magnetickému poli statoru (viz kapitola 3.2.5.). Je vhodné, po odčasování kontrolovat délku skluzové periody (doba mezi napěťovými špičkami) a po dosažení nastavené skluzové frekvence provést nabuzení.

V procesu nabuzení hraje velmi podstatnou (kladnou) roli regulátor $\cos \varphi$. Vzhledem k tomu, že $\cos \varphi$ je funkcí polohy rotoru (a zatížení) vůči mg. poli statoru, regulátor nastaví počáteční budící proud dle aktuální polohy. Pokud nejsou mg. póly ve správné poloze, zažádá o max. budící proud (tzv. „forsírovka“) a tím vtáhne rotor do synchronizmu. Toto je také patrné na obr. č. 40. Po odblokování regulátoru byl tyristorový můstek na cca 200 ms otevřen naplno, poté nabudil na budící proud, který odpovídal žádanému účíníku.

4.2.4. Konstrukční uspořádání POSM



Obrázek 41 - PEG POSM ve stacionárním budiči PEG 360/ μ P7, synchronní pohon boxerkompresoru PZP Tvrdonice

Pro antiparalelní zapojení výkonového tyristoru a diody je použit bezpotenciálový modul tyristor/dioda na chladiči s přírodním chlazením. Pro omezení délky vodičů k řídicí elektrodě tyristoru, je řídicí obvod umístěn vedle silového modulu.

Tuto konstrukci POSM jsem zvolil pro montáž do rozváděčové skříně spolu se stacionárním budičem. POSM je umístěna vedle výkonového bloku a připojena krátkými kabely paralelně k DC výstupu tyristorového měniče.

V současné době existují celkově čtyři

výrobní varianty:

1. POSM pro stacionární budiče jako doplněk tyristorovým můstkovým usměrňovačům,
2. POSM jako náhrada spínacích bloků přepětových ochran ČKD Elektrotechnika – UZP 211-217 pro budiče RBL (následující obrázek č. 40),
3. POSM jako náhrada spínacích bloků přepětových ochran ČKD Elektrotechnika – UZP 211-217 pro budiče SBM,
4. zákaznické konstrukce (TES Vsetín, rotační budiče synchronních generátorů).

Návrh a konstrukce a zpracování POSM vychází ze základních podmínek:

- spolehlivost,
- mechanická pevnost,
- dlouhá životnost.



Obrázek 42 - Náhrada Přepět'ové ochrany UZP 211 v rotačním budiči RBL

Na obr. č. 40 je fotografie rotačního usměřovače budiče typu RBL. V horní části je vidět náhrada přepět'ové ochrany - bloku UZP 211, její spínací části. Impulzní část této ochrany je nahrazena ocelovým vývažkem (ve spodní části), z důvodu zachování vyvážení rotačního kola.

Mechanická pevnost elektronické části je zajištěna zalitím desky plošného spoje fixační hmotou.

Při umístění POSM na rotačním soustrojí mimo osu rotace je nutné spočítat odstředivou sílu, která působí na jednotlivé součástky POSM a zajistit jejich mechanickou stabilitu.

4.3. Analýza a popis nově navržené ochrany PEG 21 MD

Jak již bylo popsáno v článku 3.2.6.9., ochrany proti asynchronnímu chodu nepracují vždy dobře a spolehlivě. To platí i pro ochrany moderní konstrukce, tzv. „chytré ochrany“, kde ani technik výrobního závodu tento ochranný článek nezprovoznil. Bylo to díky proměnlivému cyklickému zatížení (boxerkompresor s nerovnoměrným chodem, což je ale u zátěžných strojů tohoto druhu normální provozní stav). Proto jsem definoval principiálně nový způsob vyhodnocování asynchronního chodu a navrhl novou ochranu, která splňuje požadované parametry.

4.3.1. Požadavky na nově vyvíjenou ochranu PEG 21 MD

Při vývoji nové ochrany proti asynchronnímu chodu jsem vycházel z následujících požadavků:

- a) spolehlivost provozu
 - a. ochrana musí vždy vypnout při definované poruchové události,
 - b. ochrana nesmí vypnout při běžném bezpečném provozu, nebo v přechodových stavech, které přímo neohrožují chod soustrojí,
 - c. ochrana musí signalizovat poruchové výstražné hlášky a havarijní stavy,
- b) ochrana musí obsahovat blokovací obvody, které zajišťují její deaktivaci při rozběhu a vypínání soustrojí,
- c) diagnostiku stavu nabuzení motoru (stav přebuzení, podbuzení, $\cos \varphi = 1$),
- d) signalizaci provozních a poruchových stavů
 - a. ochrana musí signalizovat poruchové výstražné hlášky a havarijní stavy
 - b. musí signalizovat provozní oblast, v jaké se motor nachází – podbuzený/přebuzení stav

Ad a)

Princip vyhodnocování poruchového stavu – asynchronního chodu – tj. proklouznutí rotoru o pólovou rozteč, musí zajistit bezpečnou identifikaci poruchového stavu. Nesmí reagovat při tzv. kývání rotoru (změna zátěžného úhlu ϑ), na druhé straně při proklouznutí (ztrátě pólové soudržnosti) musí bezpečně tento stav vyhodnotit. Spolehlivost provozu jakéhokoliv komponentu regulace a řízení je nejdůležitější požadovanou vlastností.

Ad b)

Synchronní motor se rozbíhá asynchronním rozběhem, tzn. po dobu rozběhu, až do doby synchronizace, musí být ochrana blokována.

Ad c), d)

Diagnostika stavu nabuzení je vhodná jak pro nastavování ochrany, tak pro servis a profylaktiku ochrany. Je nutné si uvědomit, že ochrany, jako nadřazený bezpečnostní prvek musí procházet pravidelnými kontrolami a revizemi v souladu s platnými ČSN a provozními předpisy.

Stejně tak je nutné vizualizovat provozní stavy (přítomnost napětí, blok, deblok, pólový prokluz, TRIP). Funkci TRIP je nutné signalizovat i po pominutí poruchového stavu (paměť s resetem).

4.3.2. Návrh ochrany PEG 21 MD

Při návrhu ochrany jsem vycházel z chování stroje při prokluzu o pólovou rozteč. Jak jsem již uvedl výše, v kapitole 4.2, při prokluzu o pólovou rozteč se mění hodnota účinníku z provozního (kapacitního) účinníku přes $\cos \varphi = 1$ do induktivní oblasti a přes $\cos \varphi = „0“$ (nestabilní stav) přejde zpět do kapacitní oblasti. (obr. č. 43) Budeme-li vycházet z toho, že pokud se aktuální (okamžitý) účinník motoru nachází v rozsahu limitních účinníků $\cos \varphi_C \text{ mez} \geq \cos \varphi_m$ a zároveň $\cos \varphi_m \leq \cos \varphi_i \text{ mez}$ (obr. č. 43 – oblast nestability) a do této oblasti se

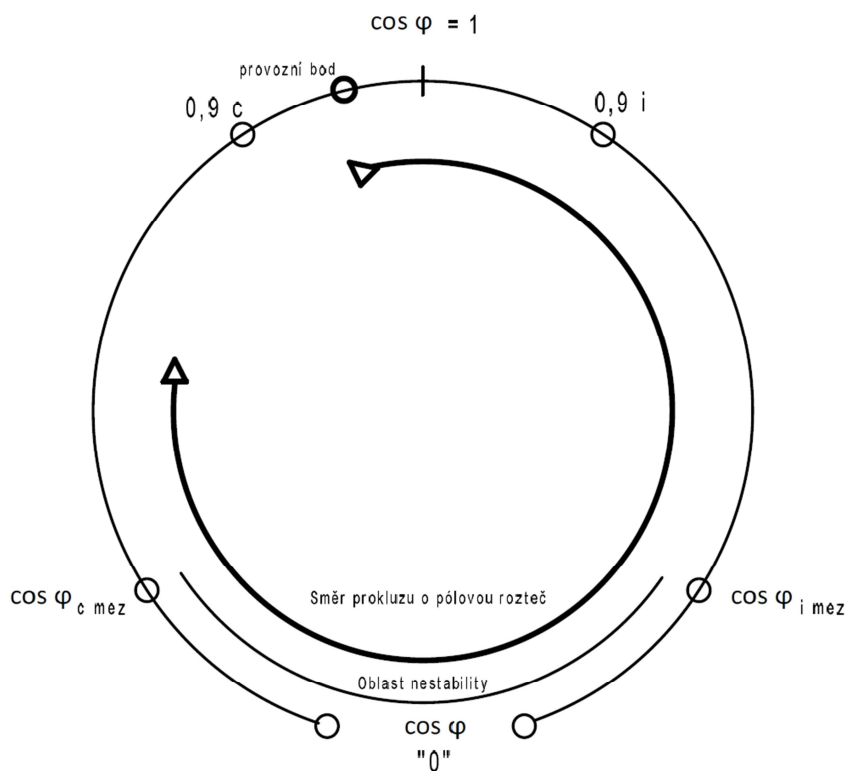
dostal z oblasti induktivního účinníku (přes limitní stav $\cos \varphi_{i \text{ mez}}$), můžeme tento stav vyhodnotit jako prokluz o pólovou rozteč. Tato oblast je naznačena na obr. 43, jako mez nestability, je to provozní oblast, v které se motor neudrží a skrze tuto oblast se dostane do přebuzeného stavu – oblast kapacitního $\cos \varphi$.

Částečně se do této oblasti, resp. do oblasti hluboce kapacitního $\cos \varphi$, může motor dostat v odlehčeném stavu a vysokým budícím proudem. Tento stav musí umět ochrana rozpoznat, protože se do nestabilní oblasti motor dostal z kapacitního režimu přes bod $\cos \varphi_{c \text{ mez}}$ a tedy se nejedná o asynchronní chod.

$\cos \varphi_{c \text{ mez}}$ - hranice nestability stroje v kapacitním režimu

$\cos \varphi_m$ - provozní bod - okamžitý účinník motoru

$\cos \varphi_{i \text{ mez}}$ – hranice nestability stroje v induktivním režimu



Obrázek 43 - Pracovní limity ochrany PEG 21 MD

Limitní hodnoty $\cos \varphi_{c \text{ mez}}$ a $\cos \varphi_{i \text{ mez}}$ nelze obecně specifikovat. Záleží na konstrukci stroje (hladký rotor/vyniklé póly, počet pólů, vzduchová mezera, výpočet stroje...), jmenovitých hodnotách a jeho činném zatížení.

Lze však říci, že u strojů s hladkým rotorem je mez stability v induktivním režimu nižší (vyšší hodnoty účinníku), než u strojů s rotorem s vyniklými póly.

U strojů s hladkým rotorem může dojít k prokluzu již při účinnících pod $0,9i$, u strojů s rotorem s vyniklými póly tato mez stability je cca u $\cos \varphi$ pod $0,4i$.

Samotný prokluz o pólou rozteč však není pro motor havarijní stav. Je nutné si uvědomit, že drtivá většina synchronních motorů je konstruována na rozběh v asynchronním chodu, tzn., že motor musí umět krátkodobě pracovat v asynchronním chodu.

K falešné reakci ochrany dochází také při odstavování motoru, kde, vlivem přechodového stavu, občas dochází k falešnému chybovému hlášení. (To je způsobeno zpožděným příchodem blokovacího signálu pro ochranu a dozníváním proudového signálu motoru vlivem přechodného děje při vypnutí stroje (hoření oblouku ve výkonovém vypínači). Tato nesprávná poruchová hláška nezpůsobí falešné vypnutí (motor byl odstaven plánovaně, nebo od jiné poruchy), může však dojít k nesprávnému zásahu obsluhy stroje vlivem mylné poruchové hlášky. K tomuto jevu pravidelně docházelo při provozním odstavování částečně zatíženého stroje o výkonu 4 MW pohánějící pístový kompresor na podzemním zásobníku plynu v Dolních Dunajovicích³⁸.

Obecně lze říci, že pro motor není havarijním stavem omezený počet prokluzů v určeném časovém období. Tento fakt jsem použil při eliminaci falešných, či zbytečných odstavení pohonů vlivem krátkodobého asynchronního chodu v návrhu ochrany PEG 21 MD.



Obrázek 44 - Ochrana proti asynchronnímu chodu PEG 21MD bez předního krytu

Napájení ochrany

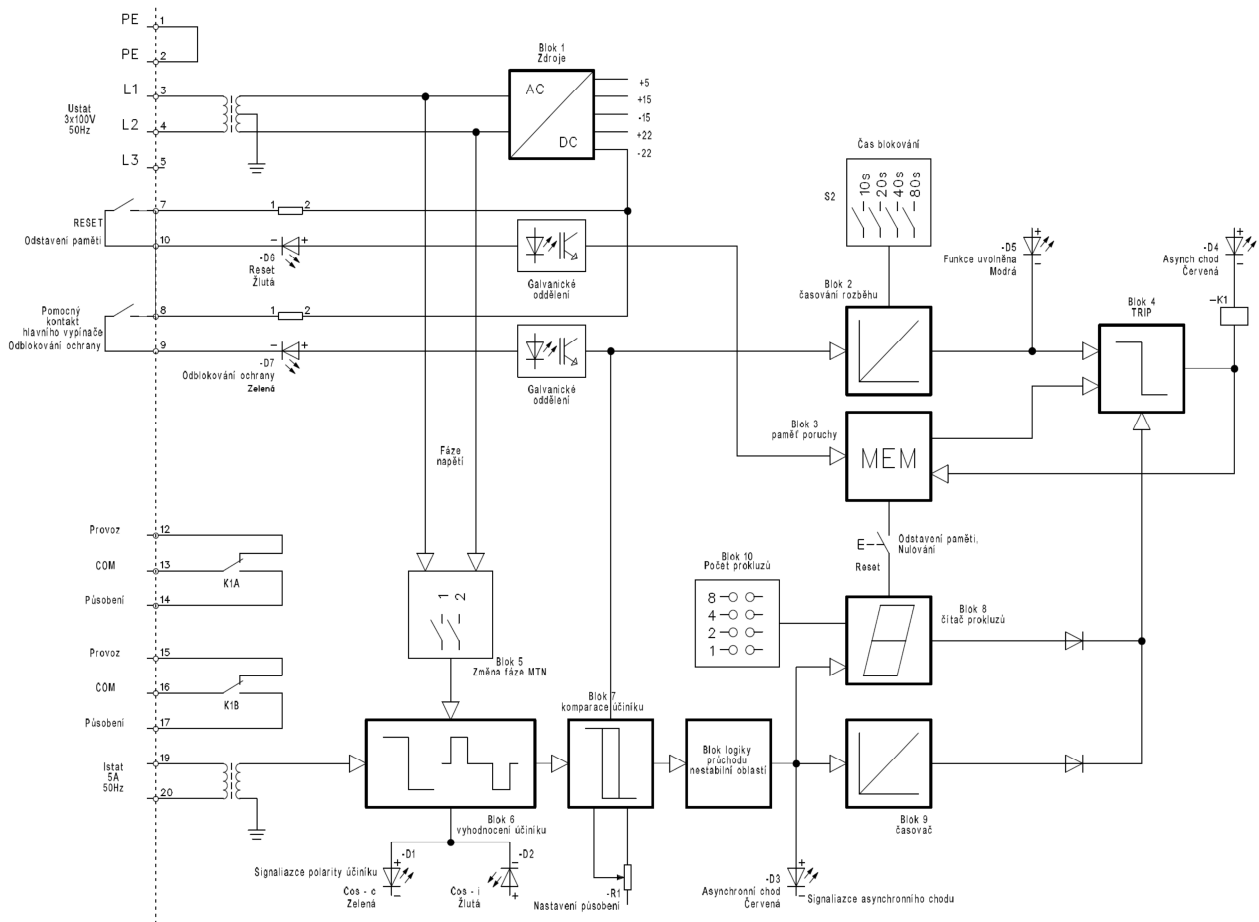
Ochrana je napájena z napětového vstupu MTN, tzn. z napětové hladiny 100 V AC. Odběr

³⁸ Synchronní motory 2B 411-20H, v.č.127502-127505, 4 000 kW, 6 kV, 403 A, 300 min⁻¹, buzení 100 V, 275 A, chlazení IWC 37A71, krytí IP 44, 300 min⁻¹, buzení bezkroužkové, rotační budič RBL 5, 380 V, 170 A st., 98 Vss, 275 Ass, chlazení IC 37, krytí IP 44, v.č. 127 506-127509

ochrany je velmi malý, MTN není proto napájením ochrany zatěžován. Výhodou je, že není zapotřebí jiného napájecího napětí (zajištěného). Přítomnost napětí 100 V AC z měřících transformátorů napětí bývá hlídána jinými ochranami (podpěťová ochrana).

Pozn.: Ochrana D21, která byla používána pro hlídání asynchronního chodu do začátku 90-tých let, byla napájena ze zajištěného DC napětí, převážně hladiny 220 V, resp. 110 V.

(Obr. č. 42) Signál 100 V AC z MTN, napětí L1/L2 je přiveden na svorky 3; 4.. Blok 1 znázorňuje zdrojovou část, zde se vytvářejí všechny potřebné napěťové hladiny: +5 V; +15 V; -15 V; +22 V; -22V. Galvanické oddělení zajišťuje převodní transformátorek s izolační hladinou 2 kV.



Obrázek 45 - Blokové schéma ochrany PEG 21 MD

Princip funkce ochrany

Skutečný $\cos \varphi$ je vyhodnocován ze signálu z měřícího transformátoru napětí – MTN - svorky 3; 4 (napěťový signál L3 je přiveden na sv. 5, je však nevyužitý) a signálu proudu z měřícího transformátoru proudu MTP. V bloku č. 5 je možné nastavit polaritu signálu napětí.

V bloku č. 6 je z proudového a napěťového signálu vyhodnocen účinník a převeden na DC

signál. Pro účely kontroly a nastavování ochrany je účinník (kapacitní/induktivní) signalizován LED D1 a D2. Princip vyhodnocování účinníku je popsán v dalším odstavci.

Blok 7 pracuje jako nastavitelný komparátor, s nastavenými hodnotami limitních účinníků $\cos \varphi_{c \text{ mez}}$ (pevně nastaveno) a $\cos \varphi_{i \text{ mez}}$ (prvkem R1). Toto nastavení se liší pro stroje s vyniklými póly a hladkým rotorem (popsáno výše). Výstupní logický signál komparátoru je přiveden do bloků č. 8 a 9 přes blok logiky průchodu nestabilní oblastí.

Blok č. 8 pracuje jako čítač prokluzů s nastavením povolených prokluzů na hodnotu 1; 2; 4; a 8. Po dosažení nastaveného množství prokluzů dává signál do bloku č. 4 – TRIP a dojde k odstavení pohonu (relé K1). K odstavení pohonu dojde také, pokud je motor v nestabilní oblasti (obr. č. 43) déle, než je doba nastavená v bloku časovače 9 (nastavitelné 3-100 s, nebo s možností zablokování této funkce). Aktuální počet prokluzů je signalizován na displeji a to i po odstavení pohonu. Hodnota je zapamatována do doby opětovného spuštění motoru, nebo ručního, či dálkového resetu.

Vyhodnocení účinníku

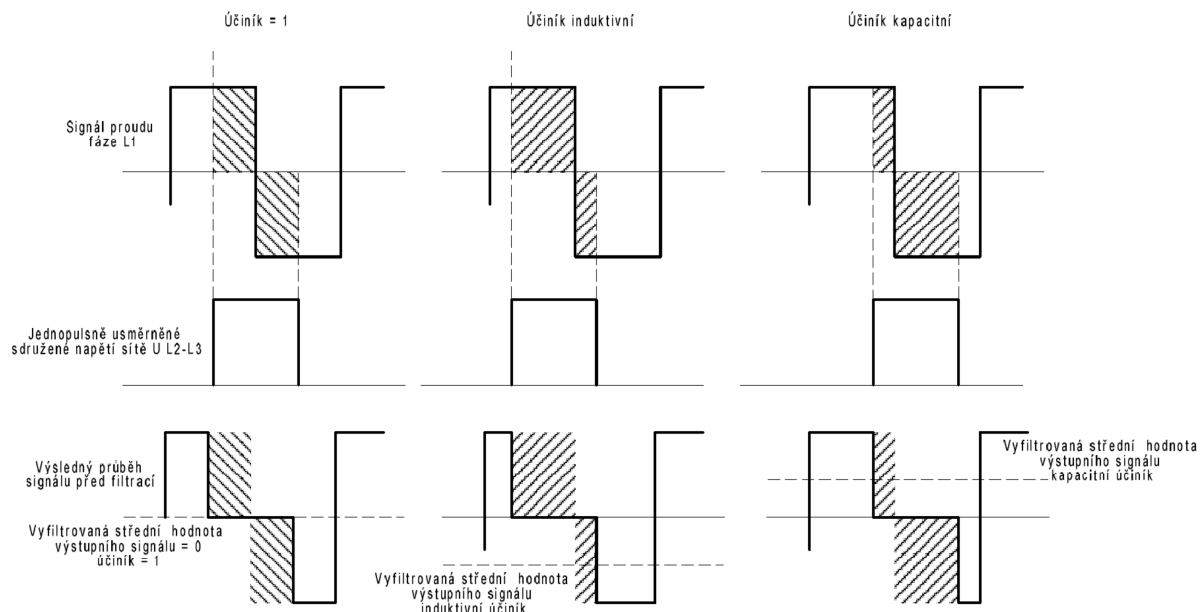
Pro vyhodnocení účinníku jsem použil analogový princip, tj. „klíčování“ upraveného signálu proudu jedné fáze motoru (proud z měřicího transformátoru proudu MTP fáze motoru) sdruženým napětím (napětí z měřicích transformátorů napětí MTN). Při $\cos \varphi_m = 1$ je fázor proudu posunut o 90^0 el. vzhledem k fázoru napětí (to odpovídá např. pro signál proudu fáze L3 a sdružené napětí fází L1 a L2). Princip „klíčování“ byl již použit v analogových regulačních systémech buzení ČKD-E. Tento princip je graficky znázorněn na obr. č. 46.

Signál proudu fáze L1 je vytvarován do obdélníků o definované amplitudě. Signál napětí fází L2/L3 je jednopulsně usměrněn a vytvarován do obdélníků stejné amplitudy. V oblasti, kdy signál napětí není nulový, je signál proudu potlačen k nule (viz šrafované části na obr. č. 46). Výsledná vyfiltrovaná střední hodnota „vyklíčovaného signálu je potom úměrná skutečnému účinníku a to v kladné polaritě účinníku kapacitnímu, v záporné polaritě účinníku induktivnímu.

Tento způsob vyhodnocování účinníku má samozřejmě řadu nevýhod. Jednou z těchto nevýhod je nelinearita přepočtu hodnoty vyfiltrovaného signálu napětí na účinník. V našem případě však potřebujeme stanovit pouze dvě hodnoty, které budeme komparovat a to jednu v induktivní oblasti a druhou v oblasti kapacitní a ty můžeme stanovit s potřebnou přesností. Požadavky na přesnost komparace jsou však velmi malé (přesnost +/- 0,1 je bohatě dostačující). Výhoda tohoto principu je však v jeho jednoduchosti (tím i spolehlivosti) a nákladech na realizaci.

Paměť

Nutnou funkcí každé ochrany je paměť poruchového stavu. Tuto funkci zajišťuje blok č. 3 – paměť. Pokud nastane odstavení vlivem ochrany, je tato skutečnost, až do místního, či dálkového resetu, zapamatována.



Obrázek 46 - Princip vyhodnocení hodnoty účinníku

Blokování po dobu rozběhu

Po dobu rozběhu soustrojí, tzn. dobu, kdy je stroj „legálně“ v asynchronním chodu je nutné ochranu blokovat. Čas je možno nastavit kombinací váhových časů 10 s; 20 s; 40 s; 80 s. Výsledný čas blokování je dán součtem sepnutých časových úrovní. Počátek časování je odvozen od sepnutí pomocného kontaktu hlavního vypínače motoru. Je možno také použít signál o sepnutí vykrácení rozběhové tlumivky (pokud se používá). Pomocný kontakt (beznapěťový) je přiveden na sv. 8; 9 účastnické svorkovnice ochrany (obr. č. 45).

TRIP a signalizace

K dispozici jsou dva galvanicky oddělené kontakty výstupního relé K1. Zatížitelnost kontaktů K1 je 250 V AC/DC; 5 A.

Jeden z kontaktů je nutné zapojit přímo do vypínacího obvodu hlavního vypínače motoru³⁹ a druhý je možno použít pro signalizaci poruchového stavu do nadřazeného systému.

Zkoušky a uvedení do provozu ochrany

Postup zkoušek a uvedení do provozu ochrany je podrobně uveden v literatuře [43]. Nastavování, zkoušení a provádění pravidelných revizí starých ochranných systémů (D21) bylo velmi komplikované, mnoho revizních techniků to neumělo. Jedním z cílů konstrukce nové ochrany bylo zjednodušení těchto zkoušek a kontrol.

³⁹ U pohonu turbokompresorů se používá vypínací logika s paralelně řazenými kontakty poruchových čidel, ochranných a dalších členů, na rozdíl od systémů těžních strojů, kde se používá k odstavení pohonu tzv. „bezpečnostní obvod“, který je realizován klidovými kontakty zapojených v sérii.

Kontrola za stojícího stavu soustrojí:

1. kontrola napájecího napětí (je signalizováno LED diodou),
2. nastavení doby blokování (doby rozběhu soustrojí).

Kontrola a nastavení za chodu soustrojí:

1. kontrola správnosti signálů proudu a napětí z MTP a MTN - podle V křivky synchronního motoru nastavíme buzení $\cos \varphi = 1$, tato hodnota musí odpovídat i LED kontrolkám D1 a D2, které zhasnou. Při přibuzení musí signalizovat zelená LED kapacitní režim, při odbuzení žlutá LED režim induktivní. Pokud je signalizace opačná, je nutné změnit polaritu napětí z MTN – změnou polohy přepínačů 1; 2, blok č. 5,
2. kontrola vyhodnocení asynchronního chodu - je možno provést v kapacitním režimu přebuzením odlehčeného synchronního stroje a přepnutou polaritou měřícího napětí. Tímto se nasimuluje chod v hluboké indukci a ochrana zareaguje. Je možné také snížit buzení pod mez stability a legálně nechat proklouznout pohon v asynchronním chodu a kontrolovat reakci ochrany.

Výhodou a jednou z hlavních předností ochrany je, že není nutné na ochraně nastavovat parametry motoru – asynchronní chod má stejný průběh nezávisle na konstrukci stroje. V nastavení ochrany je nutné pouze rozlišit, pro jaké synchronní stroje je ochrana určena. Stroje s hladkým rotorem mají podstatně širší oblast nestability a dochází k „utržení“ stroje ve vyšším induktivním účinníku, než u strojů s vyniklými póly. Hranice nastavení limity účinníku pro stroje s hladkým rotorem je 0,7 ind; pro stroje s vyniklými póly je hranice 0,3 ind.

Konstrukce ochrany

Ochrana je konstrukčně uzpůsobena pro montáž do rozváděčové skříně, na DIN lištu. Účastnická svorkovnice je osazena bezšroubovými pérovými svorkami, které zajišťují kvalitní a trvalý přítlak a vylučují přechodové odpory.

Priority návrhu a konstrukce

Ochranu jsem navrhoval pro odstranění nedostatků stávajících, současné době provozovaných ochran a to jak starých ochran D21 (i přes své stáří je jich stále v provozu velké množství), tak i nových, moderních multifunkčních ochran, kde ochrana proti asynchronnímu chodu je jedním z článků.

1. Spolehlivost chodu – ochrana musí být funkční po celou dobu provozu, musí spolehlivě vypínat při poruchovém stavu a naopak nesmí falešně vypínat
2. Jednoduchost uvádění do provozu – ochrana nesmí být závislá na výpočtových parametrech stroje
3. Snadná kontrola a revidovatelnost

Provozní odzkoušení

Ochranu jsem testoval na soustrojí sestávající se ze synchronního motoru o výkonu 30 kVA s buzením přes sběrací kroužky a stejnosměrného dynama o výkonu 40 kW.

Synchronní motor byl napájen z pevné sítě 3x 400/230 V, 50 Hz. DC dynamo na stejné hřídeli jsem zatěžoval tyristorovým invertorem (šestipulzní usměrňovač pracující v inverterovém režimu) s plynulou regulací zátěže, pracujícím taktéž do sítě 3x 400/230 V, 50 Hz. Na tomto modelu jsem mohl nasimulovat veškeré provozní a poruchové stavy, včetně přechodu do generátorického režimu.

Prototypové zkoušky jsem provedl na synchronním motoru 2B 411-20H, v.č.127502, 4000 kW, 6 kV, 403 A, 300 ot/min, buzení 100 V, 275 A, chlazení IWC 37A71, krytí IP 44, 300 min⁻¹, buzení bezkroužkové, rotační budič RBL 5, 380 V, 170 A st., 98 Vss, 275 Ass, chlazení IC 37, krytí IP 44, v.č. 127 506, pohánějící boxerkompresor v podzemním zásobníku plynu firmy Innogy v Dolních Dunajovicích. Testy byly provedeny při komplexních zkouškách v 04/2017, před zahájením vtláčečí sezony 2017. Testy ochrany byly provedeny za účasti inspektorů Báňského úřadu Brno. Na základě úspěšných testů jsem vystavil na soubor instalovaných ochran výchozí revizi.

Pozn. Soubor ochran byl umístěn v prostředí „normálním“, tj. bez nebezpečí výbuchu. Na případné umístění této ochrany do prostředí s nebezpečím výbuch, zóna 1 a zóna 2 nebyl od provozovatelů požadavek, proto jsem jej neřešil.

Závěr kapitoly 4.4.

V této kapitole jsem principiálně popsal chování synchronního motoru při prokluzu o pólovou rozteč (jeho elektrických parametrů, předně účinníku). Tento popsaný princip jsem použil při vývoji nové ochrany proti asynchronnímu chodu. Provedl jsem její elektrický i mechanický návrh zajistil jsem výrobu prototypů. Její funkčnost (všechny typově navržené parametry) jsem provozně odzkoušel na soustrojí synchronní motor/DC dynamo. Prototypové zkoušky ochrany jsem provedl na synchronním motoru o výkonu 4 MW za přítomnosti inspektorů Báňského úřadu a vystavil jsem výchozí revizní zprávu.

Dle mých informací (literatura, produktové informace, odborné články, provozní zkušenosti) tento způsob vyhodnocení asynchronního chodu není nikde využit a považuji jej za původní přínos této disertační práce.

4.4. Technologické funkce navrženého budiče PEG xxx/ μ P7

4.4.1. Synchronizace a technologické řízení budiče při rozběhu synchronního motoru

Jak bylo rozebráno výše, rozběh soustrojí se synchronním motorem a konkrétně okamžik synchronizace (tzn. vklouznutí rotoru synchronního motoru do synchronismu s točivým polem statoru) je problematickým okamžikem provozu soustrojí. Panoval názor, že budič je po dobu rozběhu zablokovaný (je pasivním členem) a nemůže do procesu rozběhu aktivně zasáhnout. Nový budič PEG xxx/ μ P7 s technologickým regulátorem může logikou nabuzování zásadně usnadnit rozběh a následnou synchronizaci.

Zásadním okamžikem je vlastní návrh budícího obvodu, tzn., bude-li rozběh realizován s odporem v rotoru, s přepětovou ochranou rotoru (tzn. s nulovou diodou v obvodu), nebo pouze se zkratovaným rotorem. To je nutné rozhodnout na základě znalosti konstrukce synchronního motoru (konkrétně konstrukce amortizéru) a znalosti velikosti protimomentu od zátěžného stroje, tzn., bude-li se jednat o těžký rozběh, nebo rozběh lehký a bezproblémový.

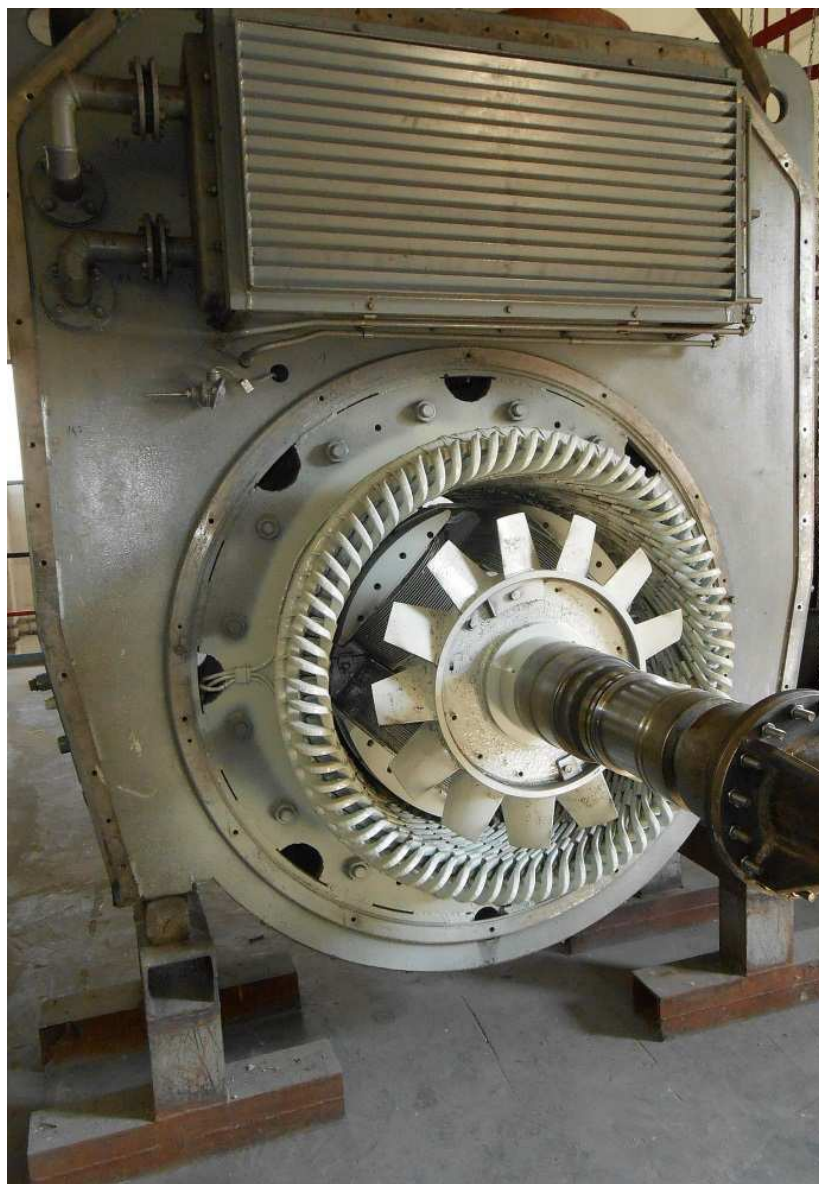
Soustrojí s lehkým rozběhem

Jsou to například důlní ventilátory, které se rozbíhají naprázdno, odlehčené a jejich protimoment je minimální. Jedná se o motory o výkonech 1,8 MW – 3,25 MW. Synchronní motory jsou pomalootáčkové, $2p = 10 - 12$, jsou osazeny valivými ložisky se stálou olejovou náplní. Jejich protimoment ve stojícím stavu je prakticky nulový (spojenými rotory motoru a ventilátoru lze otočit volně rukou). Rozběh je plynulý a trvá cca 5 - 8 s, v případě spouštění přes rozběhový reaktor (stroje nad 2,5 MW) je to cca 15 s. Po rozběhu se rotor zasynchronizuje sám, bez buzení, vlivem remanentního magnetizmu a rozdílu magnetických odporů v podélné a příčné ose (vlivem reluktančního momentu - někdy se stane, že se zasynchronizuje bez buzení posunutý o 180° el.). U pohonů tohoto typu není nutné vymýšlet sofistikovanou metodu synchronizace, stačí odčiasovat dobu rozběhu, komparovat efektivní hodnotu statorového proudu a po poklesu proudu pod nastavenou úroveň provést odblokování regulátoru a nabudit. Po nabuzení rotor vklouzne do synchronismu pod správné pólové dvojice

Soustrojí se středně těžkým rozběhem

Jedná se zde právě o pohony turbokompresorů, boxerkompresorů, dmychadel, čerpadel a další. Jsou to pohony většinou s kluznými ložisky a převodovkou (turbokompresory), kde je zapotřebí poměrně velký moment „na utržení“ (kap. 3.2.5.). Zde už je nutné věnovat větší pozornost návrhu obvodu buzení a s tím související konstrukce synchronního motoru. U motoru s rotory s kvalitním amortizérem a kruhy nakrátko vystačíme s přepětovou ochranou a nulovou diodou v obvodu. Opět potom stačí při rozběhu monitorovat statorový proud a při jeho poklesu a odčiasování provést nabuzení.

Pokud však rotor synchronního motoru nemá amortizér, nebo pouze zjednodušený – viz obrázek č. 47⁴⁰, je nutné použít pro rozběh odpor v rotoru (toto je však možné, pouze pokud motor nemá bezkontaktní budič). Motor zobrazený na obr. č. 47 měl momentová sedla, závislá na poloze rotoru vůči statoru. Pokud se rotor zastavil v této poloze, byl záběrný moment nižší, než moment potřebný „k utržení“. To mělo za následek, že se motor nerozeběhl. Pro úspěšné spuštění stroje bylo nutné zvýšit svorkové napětí motoru až na 7 kV. Takovéto napětí však již přesahuje povolenou toleranci svorkového napětí motoru a může způsobit poškození statorového vinutí.



U tohoto stroje amortizér nahrazovaly pólové nástavce z kompaktního železa, které však nedokázaly vytvořit požadovaný záběrový moment. Přídavný moment od budícího vinutí s vřazeným odporem by proto znatelně zlepšil rozběhovou momentovou charakteristiku stroje.

Obrázek 47 - Rotor synchronního motoru 32B 222-04HW1 bez amortizéru

⁴⁰ Rotor synchronního motoru 32B 222-04HW1, v.č. 127659, 6 000 V, 1 250 kW, pohánějící turbokompresor v chemickém závodě Fortischem Nováky

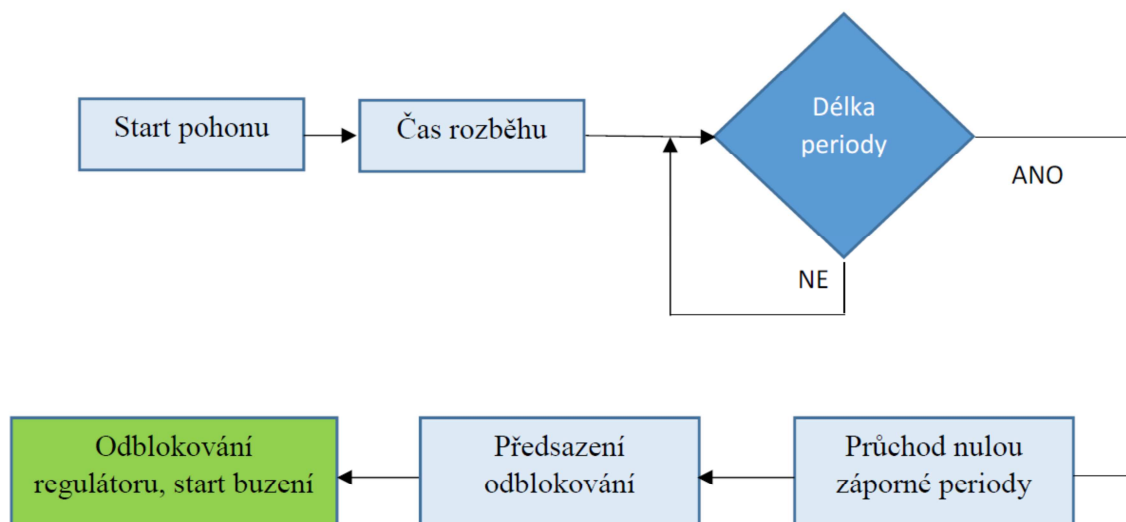
Stroje s těžkým rozběhem

Jsou to např. pohony kulových mlýnů, pohony pásových dopravníků a další pohony, u kterých nelze zaručit rozběh v odlehčeném stavu. Jako příklad bych uvedl pohon kulového mlýna v cementárně Ladce. Zde se motor rozbíhal s odporem v rotoru a provozovatel měl požadavek, aby se s výměnou budiče vyřadil i rozběhový odpor. Po vyřazení rozběhového odporu a použití přepětíové ochrany s nulovou diodou se snížil urychlující moment tak, že se otáčky při rozběhu nedostaly přes oblast momentu zvratu. Proto bylo nutné rozběhový odpor zachovat a použít technologický regulátor nového budiče PEG xxx/ μ P7 pro definování rozběhu a okamžiku nabuzení. Doba rozběhu nebyla totiž nikdy stejná, byla velmi závislá na naplněnosti kulového mlýna, tzn., nabuzení nebylo možno v žádném případě odvodit od času.

Budič PEG xxx/ μ P7 umožňuje řízení synchronizace a to několika způsoby:

- Odčasování doby rozběhu, po nastaveném čase provést nabuzení
- Nabuzení dle průběhu rotorového proudu

Realizace okamžiku nabuzení je schematicky naznačena podle následujícího vývojového diagramu – obr. č. 48.

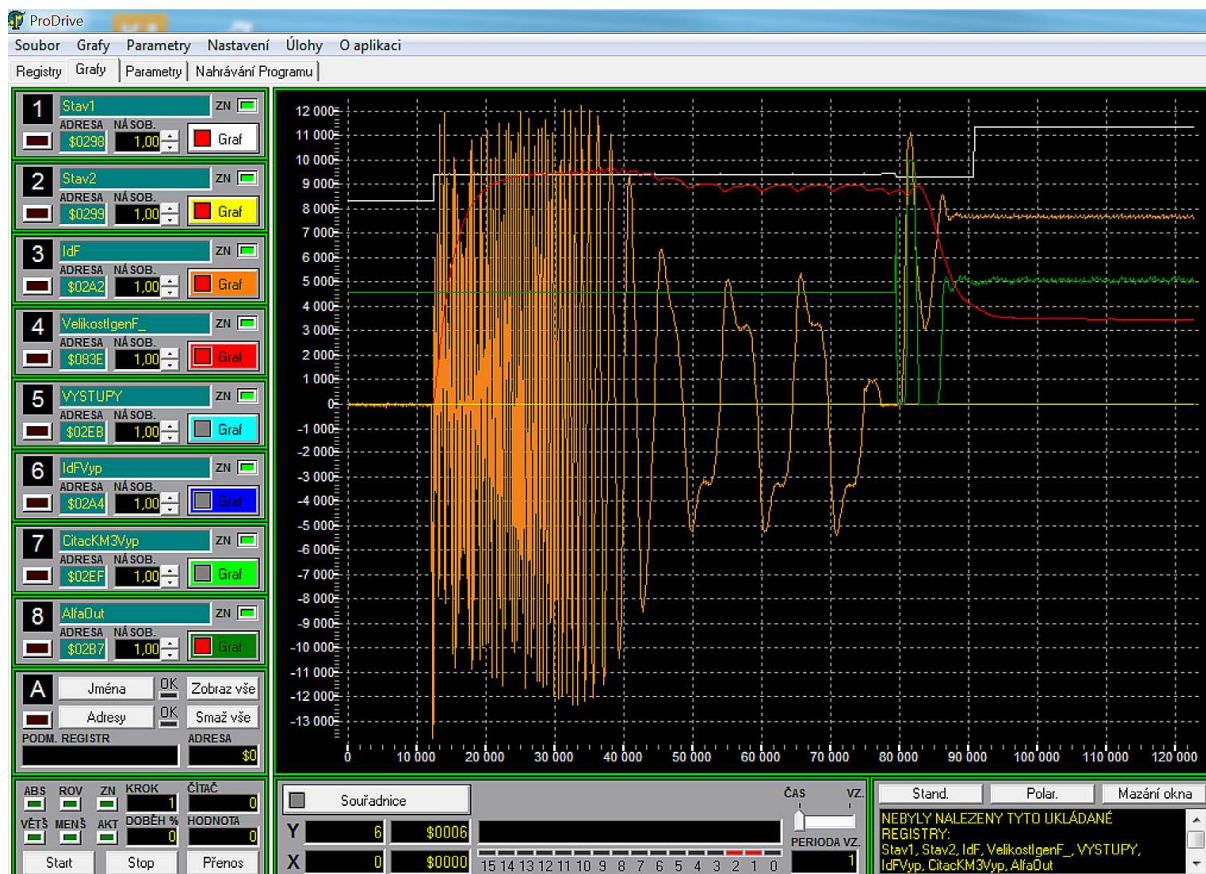


Obrázek 48 - Vývojový diagram řízení okamžiku nabuzení

Od startu pohonu je odčasována část rozběhu, od kterého začínají probíhat technologické funkce. Je to z důvodu zamezení funkčních hazardů, které mohou vzniknout na počátku snímání rozběhových veličin. Po odčasování se kontroluje doba periody vedení proudu rotoru v kladné periodě (ke konci rozběhu, při použití přepětíové ochrany již v jedné periodě nespíná tyristor, tzn., protéká proud pouze v kladné periodě přes nulovou diodu). Pokud se délka periody nemění po dvě po sobě jdoucí periody, sleduje se průchod proudu nulou a od tohoto průběhu je možno odvodit čas nabuzení, nebo odpojení rozběhového odporu, nebo jiný technologický zásah. Okamžik nabuzení je možno nastavit dle průchodu proudu nulou se zpožděním, nebo předsazením (zde je čas nastaven z průměrné doby dvou po sobě jdoucích předchozích period).

Tyto hodnoty je nutné nastavit při uvádění soustrojí do provozu, nejde je získat výpočtově, je nutné je stanovit na základě úvodních rozběhových měření. Funkce budiče ale dávají technikovi velmi komfortní nástroj, jak synchronizaci řídit a ovlivnit.

Na následujících obrázcích č. 59, 60 a 61 jsou průběhy veličin statoru a rotoru při zkouškách a nastavování budiče s technologickým regulátorem u zmiňovaného pohonu.



Obrázek 49 - Diagram č. 1 řízeného nabuzení a synchronizace stroje s těžkým rozběhem

Popis průběhu:

- Měřitko časové osy - 1 dílek je 500 ms
- Oranžový průběh – rotorový proud, 1 dílek je 10 A
- Červený průběh – proud fáze statoru, efektivní hodnota, 1 dílek je 30 A
- Zelený průběh – výstup bloku regulátorů, tj. řídicí úhel α
- Bílý průběh – vnitřní stavové hodnoty regulátoru (pro tento případ nezajímavý průběh)

Na obrázku č. 49 je oscilogram rozběhu stroje s těžkým rozběhem a řízeným nabuzením. Konkrétně se jedná o synchronní motor 1 500 kW, 2p = 28, pohánějící kulový mlýn v cementárně Ladce. Soustrojí mělo těžký rozběh, po dobu rozběhu je v rotorovém vinutí zapojen odporník 1,5 Ω bez nulové diody. Na průběhu rotorového proudu je vidět, že motor dosáhl při rozběhu ustáleného skluzu (2,5 – 3,5 s od počátku záznamu), cca 2 Hz – perioda je 500 ms. Zvlnění průběhu statorového proudu odpovídá této skluzové frekvenci a je působeno

mezipólovým prokluzem – asynchronním chodem, při kterém se periodicky mění $\cos \varphi$ a tím i jalová složka proudu.

Na obrázku č. 50 je detail okamžiku řízené synchronizace pohonu z obrázku č. 49. Po dvou, po sobě následujících periodách se stejnou délkou je vyhodnocen průchod nulou (okamžik „A“) a je vyslán impuls k rozpojení rozběhového odporníku. V okamžiku „B“ došlo k faktickému rozpojení odporníku. Doba A-B je dopravní zpoždění, způsobené převodním relé a dobou reakce výkonového stykače. Protože stykač rozepl v době, kdy jím již protékal proud zdroje, je patrné hoření oblouku vypínaného proudu. Po odeznění přechodového děje proudu byl dán impuls k odblokování regulátoru a došlo k nabuzení.



Obrázek 50 - Diagram č. 2 řízeného nabuzení a synchronizace stroje s těžkým rozběhem, detail okamžiku synchronizace

Popis průběhu:

- Měřítko časové osy - 1 dílek je 100 ms
- Oranžový průběh – rotorový proud, 1 dílek je 10 A
- Červený průběh – proud fáze statoru, efektivní hodnota, 1 dílek je 30 A
- Zelený průběh – výstup bloku regulátorů, řídicí úhel α
- Bílý průběh – vnitřní stavové hodnoty regulátoru (pro tento případ nezajímavý průběh)

Vzhledem k variabilitě regulátoru buzení bylo možné eliminovat i negativní vliv hoření oblouku ve stykači odporníku. Předsazením řídicího signálu pro rozpojení odporového stykače před okamžik průchodu proudu nulou se eliminoval vliv dopravní zpoždění sepnutí stykače a ten vypínal v nule proudu. Detail rozběhu s těmito úpravami je na obrázku č. 51. Je patrné, že vypnutí stykače odporníku je již bezproblémové (vypíná bez proudu).



Obrázek 51 - Diagram č. 2 řízeného nabuzení a synchronizace stroje s těžkým rozběhem, upravený okamžik nabuzení, detail okamžiku synchronizace

Popis průběhu:

- *Měřítko časové osy - 1 dílek - 200 ms*
- *Oranžový průběh – rotorový proud, 1 dílek je 10 A*
- *Červený průběh – proud fáze statoru, efektivní hodnota, 1 dílek je 30 A*
- *Zelený průběh – výstup bloku regulátorů, tj. řídicí úhel α*
- *Bílý průběh – vnitřní stavové hodnoty regulátoru (pro tento případ nezajímavý průběh)*

Ještě výhodnější je použití regulátoru synchronizace při odvození okamžiku nabuzení s POSM a nulovou diodou.

Zde je možné, odvodit okamžik nabuzení podle průběhu rotorového proudu (průběh rotorového proudu odpovídá poloze rotoru vůči magnetickému poli statoru). V závěru rozběhu, když je skluzová frekvence již malá, protéká proud pouze v jedné polaritě (tyristor POSM již nespíná). Indukovaný proud, protékající nulovou diodou má stejnou polaritu, jako budící proud a protéká v okamžiku, kdy jsou póly mg. pole statoru a rotoru ve správné poloze

(S/J). I zde je výhodné předsadit okamžik nabuzení před počátek průtoku proudu. V tomto případě je nutné odblokování regulátoru odvodit od doby ukončení poslední periody, nikoliv od počátku průchodu proudu (známá situace „vystupte dvě stanice před konečnou“). V tomto případě je možné použít vývojový diagram na obr. č. 48.

Na obr. č. 51 je také zobrazeno chování proudového regulátoru – žádost o řídicí úhel otevření tyristorového můstkového usměrňovače – zelený průběh. Hodnota „ $\alpha = 0$ “ (poměrné jednotky regulátoru) odpovídá plnému otevření usměrňovače. Po odblokování (čas cca 500 ms od počátku záznamu) se regulátor z počáteční inicializační hodnoty zablokovaného regulátoru (3 800 p.j.) po krátkém přechodovém impulzu naplno otevře (0 p.j. odpovídá $\alpha = 0$). Budící proud stoupá s časovou konstantou odpovídající velikosti indukčnosti rotoru synchronního stroje a velikosti napětí otevřeného tyristorového můstku. V okamžiku, kdy rotorový proud dosáhne žádané hodnoty (čas 560 ms od počátku záznamu), začne můstek zavírat – hodnota α začíná vzrůstat s časovou konstantou proudového PID regulátoru až na hodnotu plného uzavření (10 000 p.j.). Poté následuje regulační překmit rotorového proudu a snížení pod žádanou hodnotu (opětovné uzavření – $\alpha = 0$, čas 640 - 750 ms) a následné ustálení řídicího úhlu, které má za následek ustálený budící proud, odpovídající žádané hodnotě. Po ustálení rotorového proudu je ustálen i statorový proud a motor běží v synchronním chodu. O bezproblémové synchronizaci svědčí i fakt, že statorový proud klesá na pracovní hodnotu plynule, bez zákmitu. Regulační zásah v čase 640 - 750 ms je také způsoben polohou rotoru vůči statoru, zátěžný úhel odpovídá účinníku v kapacitní oblasti a meze regulátoru účinníku, které jsou po dobu rozběhu aktivní, zajistily krátkodobé odbuzení a tím i ustálení zátěžného úhlu na pracovní hodnotě.

Pozn.: Okamžité hodnoty průběhů na obr. č. 49 - 51 jsou vygenerovány z programu ProDrive.

4.4.2. Analýza vibrací v multifunkčním budiči PEG xxx/ μ P7

Problematiku vibrací soustrojí jsem probral v teoretické analýze, v kapitole č. 3.1.5. Hardware budiče řady PEG xxx/ μ P7 je uzpůsoben pro připojení čidel vibrací (max 4 ks) – akcelerometrů, měřící zrychlení vibrací, tzn., je možné získat průběh vibrací a provést Fourierovu transformaci – FFT a zjistit integrací rychlost vibrací.

Strategie návrhu rámce software budiče umožňuje do programu vkládat odladěné funkční bloky a zajistit tak programu potřebné funkce. Jedním z možných funkčních bloků je i blok Fourierovy transformace naměřených průběhů vibrací. Rozkladem na jednotlivé harmonické složky je možné zobrazovat absolutní hodnoty těchto složek a analyzovat zdroj těchto vibrací a dle toho provést zásahy, či opatření.

Zjištění těchto hodnot však není cílem, ale nástrojem. Mnohokrát jsem se setkal s rozsáhlými a mnohostránkovými protokoly plných hodnot vibrací, frekvenčních a harmonických spekter. Tyto jsou však bez porovnání, vyhodnocení a vyvození závěrů k ničemu.

Navržený multifunkční budič umožňuje následující:

- stanovit výchozí stav – ten je důležitý pro sledování vývoje (zhoršování, nebo zlepšování) mechanického chodu v závislosti na počtu provozních hodin zařízení,
- sledovat vývoj – progresi – rychlosti vibrací v dlouhodobém horizontu, predikovat dobu do střední opravy,
- sledovat vývoj – progresi – obsahu vyšších harmonických složek, predikovat dobu do nutného servisního zásahu,
- Nastavení limit výstrahy a havárie pro jednotlivé kanály.

Možnosti nastavení limit a reakce při překročení (stejně pro každý kanál):

- nebezpečná hodnota vibrací – výstraha,
- havarijní hodnota vibrací – odstavení pohonu,
- překročení nárůstu rychlosti vibrací v čase – výstraha (způsobují mechanické opotřebení pohonu, upozorňuje na nutný servisní interval),
- skokové zvýšení vibrací v čase – odstavení pohonu (může být způsobeno např. zadřením ložisek, nebo přeskupením hmot rotační části),
- překročení obsahu vyšších harmonických složek ve vibračním spektru.

Všechny uvedené limity pouze upozorňují na nestandardní stav provozu soustrojí a dávají provozovateli nástroj, pomocí kterého určí důvod zvýšení vibrací a rozhodne o nejvhodnějším způsobu nápravy. Vzhledem k tomu, že vlivů, které způsobují zhoršení mechanického chodu soustrojí je velmi mnoho a mohou působit v interferenci, je zde nutný individuální dohled technika.

V současné době existuje velká spousta velmi sofistikovaných vyvažovacích a měřících systémů⁴¹, které provedou i identifikaci důvodu zhoršení mechanického chodu. Nedokáží však postihnout všechny aspekty a vlivy, proto jejich závěry mohou být a často také bývají,

⁴¹ Např. zařízení firmy Schenk, SKF a dalších

zavádějící. Tyto měřicí systémy také nejsou k soustrojím většinou připojeny po celou dobu provozu; jsou používány při pravidelných kontrolách a revizích. Turbokompresory jsou vysokootáčková zařízení, proto vizualizaci, archivaci a vyhodnocení naměřených hodnot vibrací je vhodné použít při predikci termínů plánovaných pravidelných, středních a generálních oprav soustrojí turbokompresoru.

Pozn. Některé druhy vibrací lze ovlivnit velikostí budícího proudu, jsou to např. axiální vibrace způsobené nesprávným vyrováním motoru do magnetické osy (neutrální magnetický tah), nebo vibrace ve vertikálním a horizontálním směru, způsobené nesprávným vyrováním vzduchové mezery.

Analytickou funkci mechanického chodu multifunkčního budiče PEG xxx/ μ P7 považuji za velmi přínosnou a z hlediska budících souprav za jedinečnou.

4.4.3. Antipompážní regulace a ochrana turbokompresoru

Problematiku antipompáže jsem již zmínil v oddílu teoretické analýzy, v kapitole 3.1.4. Zde se chci věnovat způsobu vyhodnocení stavu pompáže v budiči synchronního stroje.

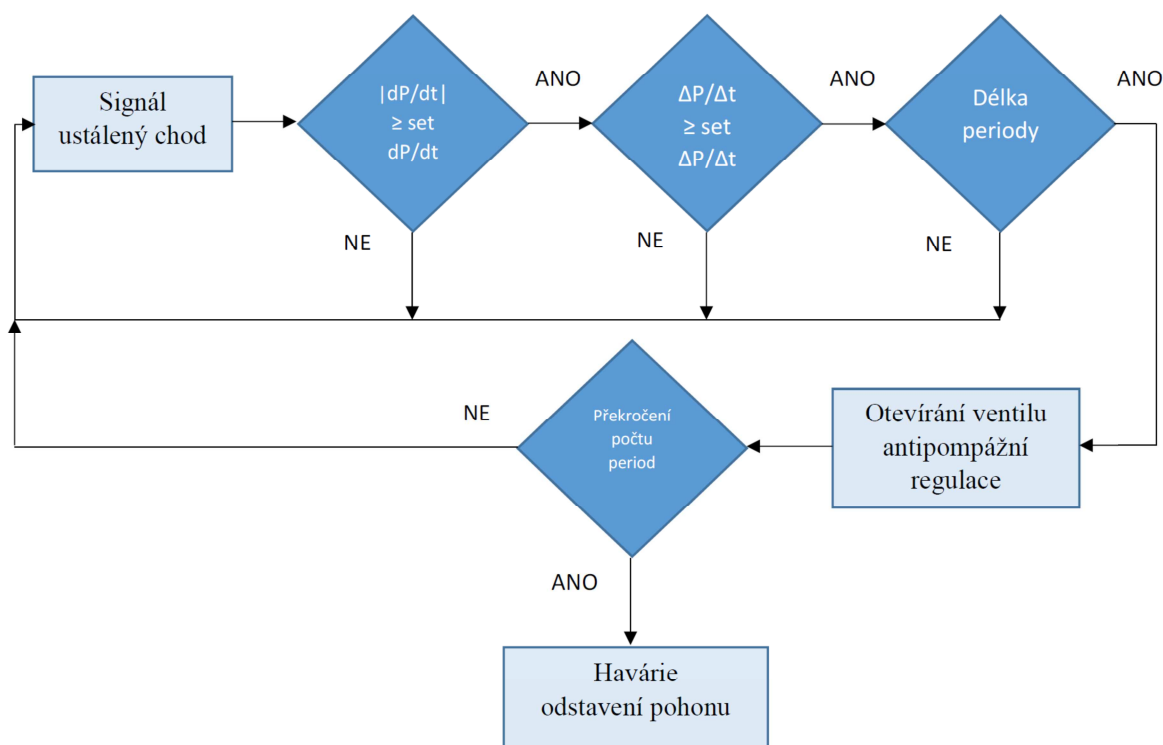
Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, stav pompáže je stav, který je pro vlastní turbokompresor nebezpečný a chod v tomto režimu může způsobit (a také v mnoha případech způsobil) havárii kompresoru. Proto antipompážní ochrany a antipompážní regulace jsou jedny z nejdůležitějších součástí řízení turbokompresoru.

Stav pompáže se vyhodnocuje v ŘS kompresoru z měření průtoků a tlaků a tyto se potom porovnávají s provozní charakteristikou turbokompresoru ($\Delta p=f(Q)$) a naměřenými mezemi stability. To bývá v mnoha případech nedostatečné, proto se do antipompážní regulace ještě zapojují údaje o poloze klapky na sání a výtlaku. Protože je nutné zajistit bezpečné vyhodnocení stavu pompáže, ponechává se ve vyhodnocení rezerva, čímž se však značně zmenšuje pracovní rozsah kompresoru.

Změny veličin tlaku, průtoků, a výkonu v závislosti na čase jsem popsal v teoretickém rozboru, (kapitola 3.1.4. a podkapitola 3.1.4.3.) na základě matematického Greitzerova modelu. Při pompáži se změny ve výtlačném množství a tlaku projeví i ve změnách činného příkonu turbokompresoru. Na základě těchto změn, hlavně jejich dynamického a cyklického chování je možno tento stav vyhodnotit jako stav „Rotujícího odtržení v oblasti kompresoru“ tedy pompáže. Jak jsem doložil na základě Greitzerova modelu, lze tento stav vyhodnotit z dynamických změn činného příkonu elektropohonu, který je měřen v budiči.

Vyhodnocení stavu pompáže v budiči nevychází z náhradních veličin a naměřených charakteristik, ale ze samé podstaty pompáže a to je velká a rychlá změna činného výkonu, mnohdy do záporných hodnot (generátorického chodu). Budič je schopen tento stav vyhodnotit, protože má k dispozici údaje o statorovém proudu a napětí a jejich fázovém posunu ($\cos \varphi$) a tím i okamžitým činným výkonu. Na následujícím vývojovém diagramu (obr. č. 52) je znázorněn základní princip vyhodnocení stavu pompáže.

Regulátor turbokompresoru vyhodnocuje ustálený chod soustrojí. Ten nastane po najetí kompresoru, ustálení teplot a zatížení do technologie. Informaci „ustálený stav“ regulátor kompresoru předává systému buzení. Většinou se jedná o beznapěťový kontakt, nebo je informace sdílena po komunikační sběrnici. Poté se pravidelně kontroluje rychlost změny činného výkonu, pokud tato překročí nastavenou mez, kontroluje se, zda-li činný výkon klesne pod nastavenou hodnotu. V případě, že se jedná o periodický děj a v nastaveném čase se činný výkon začne obnovovat, jedná se o stav pompáže a je nutné otevírat antipompážní ventil, tzn., uvolnit průchod výtlačku kompresoru. Při odstavování kompresoru je antipompážní regulace zablokována blokačí signálu „ustálený chod“.



Obrázek 52 - Vývojový diagram vyhodnocení stavu pompáže turbokompresoru v budiči řady µP7

Pokud počet cyklů pompáže překročí nastavenou hodnotu i při otevírání antipompážní klapky, dochází k odstavení kompresoru.

Vývojový diagram uvedený na obr. č. 53 je pouze principiálním vysvětlením fungování antipompážní ochrany a regulace. Sledování průběhu výkonu a jeho dynamických změn umožňuje definovat i hloubku pompáže (obr. č. 11) a v extrémním případě i polaritu výkonu – přechod do generátorického chodu. Dle nastavených parametrů ΔP pak rozpoznáme tři úrovně pompáže a je možno jim přiřadit akci, která bude provedena. Při nejhlubším stavu pompáže dochází k havarijnímu odstavení kompresoru. Je však pravděpodobné, že k tomuto stavu nedojde, protože zapůsobí dříve jiné ochrany kompresoru, pokud jsou funkční.

Závěr:

Antipompážní regulace vychází z elektrických veličin, jež jsou k dispozici pro regulaci budiče. Je to:

- fázový proud motoru,
- sdružené svorkové napětí motoru,

Z toho je vypočítáno:

- činný výkon,
- účinník,
- jalový výkon,
- zdánlivý výkon
- dynamický průběh výkonu v čase
 - o dP/dt
 - o periodičita, délka periody

Parametry nastavení antipompážní regulace:

- dP/dt , tj. tg, směrnice tečny k průběhu výkonu v čase t [-]
- ΔP , pokles výkonu v čase t_{Δ} [kW]; [s]
- délka periody změny výkonu ω [s]

Hodnoty výše uvedených parametrů se liší pro různé druhy a výkony kompresorů, musí být proto nastaveny při komplexních zkouškách a uvádění do provozu. Doporučuji tyto hodnoty kontrolovat při periodických revizích a zkouškách, stejně tak při středních a generálních opravách turbokompresoru.

Vyhodnocování stavu pompáže z elektrických veličin pohonného motoru považuji za jeden z nejdůležitějších a největších přínosů vývoje nového budícího systému. Originalita spočívá v definování parametrů a logiky vyhodnocování dynamiky změn elektrického výkonu. Na princip antipompážní ochrany jsem podal v říjnu 2017 patentovou přihlášku. Toto patentové řízení jsem v únoru 2018 pozastavil a v současné době jednám přímo s evropským výrobcem kompresorů o odkoupení tohoto principu regulace a ochrany.

Aplikační nasazení a komplexní zkoušky:

Tento způsob antipompážní ochrany byl vyzkoušen na budiči synchronního pohonu turbokompresoru na dole Paskov, závod Staříč v únoru 2015. Jednalo se jednu z prvních verzí budiče PEG10/ μ P7, napájející bezkontaktní budič typu SBM 1L173-08H. Antipompážní ochrana v budiči spolupracovala s antipompážní regulací kompresoru v technologické ovládací části. Díky nasazení této regulace k již pracující regulaci kompresoru, bylo možné rozšířit regulační pásmo kompresoru do oblasti malých zatížení o 6%, což znamenalo velké energetické úspory a zvýšilo účinnost kompresoru v oblasti malých dodávaných množství.

V této aplikaci spolupracoval budič s technologií a dálkovým vizualizačním systémem také jako převodník elektrických veličin motoru. Data byla předávána po sběrnici RS 485, protokolem ModBus.

4.4.4. Řízení buzení při dosažení limitních elektrických a výkonových parametrů

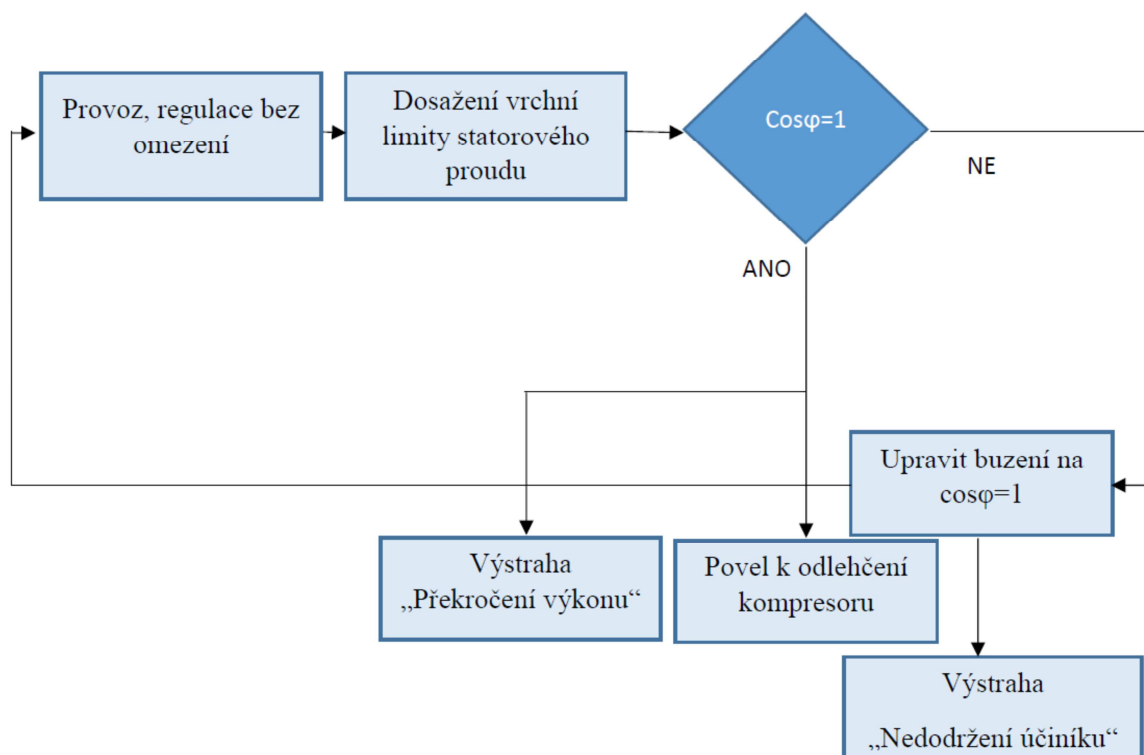
Jednou z důležitých funkcí budiče jsou aktivní limity statorového proudu a výkonu. Jedná se o limity minimální (činný výkon) - ty se pouze signalizují jako výstraha a limity maximální. Při výskytu maximálních hodnot má budič možnost je částečně ovlivnit.

4.4.4.1. Limita „Dosažení maximálního proudu“

Této limitní hodnoty může v následujícím provozním stavu:

V regulaci budiče na vzdálený, nebo místní účinník, a to v případě potřeby maximálního kompenzačního výkonu a plném činném zatížení turbokompresoru.

Nastavením meze $\cos \varphi$ souhlasně se štítkem synchronního motoru by bylo možno dosáhnout odpovídajícího účinku, ale to by nám omezovalo možný využitelný kompenzační výkon v případě malého činného zatížení turbo-kompresoru. Při využití této aktivní limity můžeme záporný doraz účinníku nastavit hluboko do kapacitní oblasti bez obav o přetížení motoru. Blokové schéma regulace je znázorněno na následujícím obrázku č. 53.



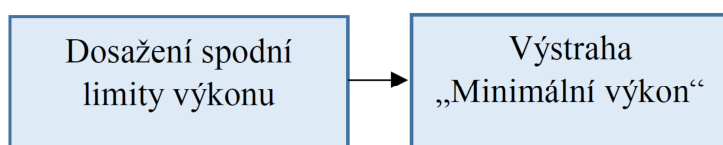
Obrázek 53 - Vývojový diagram regulace aktivní limity statorového proudu

Pro synchronní motor je důležitý štítkový údaj statorového proudu a ten není možné překročit. V případě překročení by došlo k odstavení pohonu nadproudovou, časově závislou ochranou. Jedná se však o proud zdánlivý, tzn., vektorový součet činného a jalového proudu. Tento proud tedy můžeme snížit minimalizací jalové složky proudu, která je využívána ke kompenzaci jalového proudu, většinou se zpětnou vazbou na vzdálené místo.

V případě dosažení limity statorového proudu (je prioritní zajištění dostatečného výkonu turbokompresoru, kompenzace jalové energie je doplňková funkce), probíhá zjištění, s jakým účínkem pracuje synchronní motor, pokud je vyšší (v kapacitní oblasti), než „1“ dochází k odbuzování. Zároveň s tím se vysílá hláška „Nedodržení účínku“, tzn., informace, že místo vzdálené kompenzace bude nedokompenzované. Pokud odbuzení proběhne až do hodnoty $\cos \varphi = 1$ a statorový proud je stále nad nastavenou hodnotou, aktivuje se limita „překročení výkonu“ – viz dále.

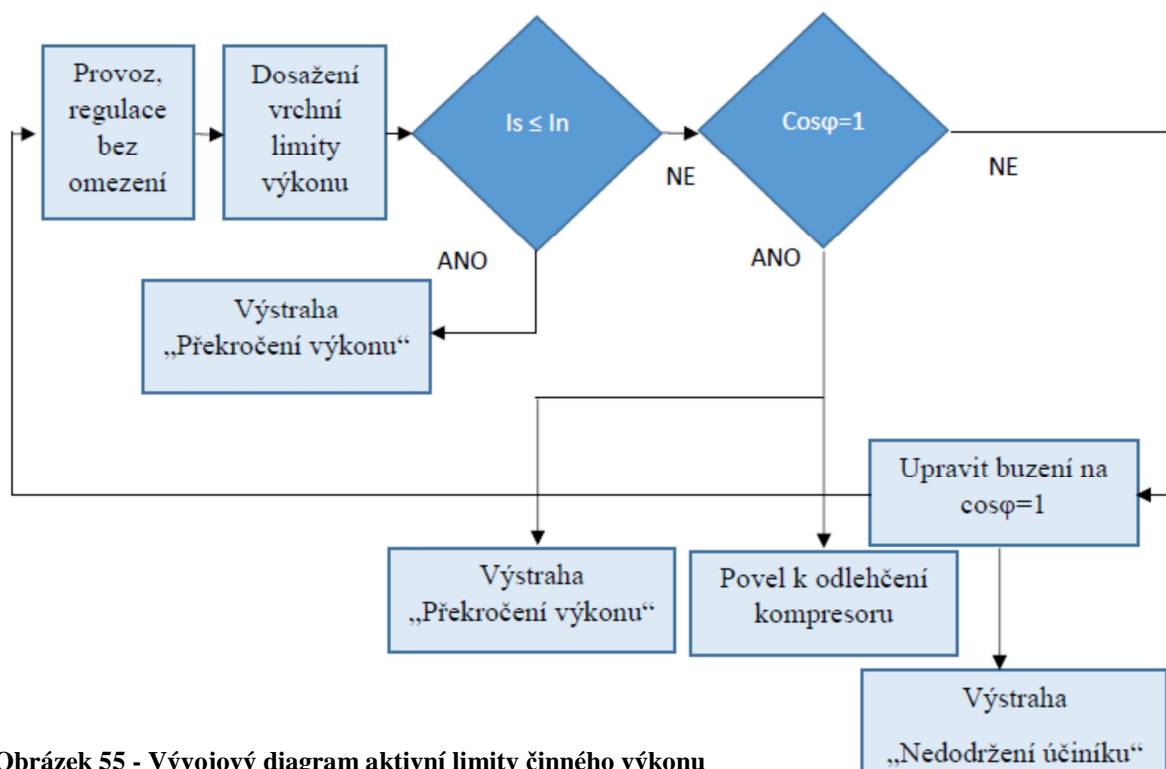
4.4.4.2. Limita „Minimální výkon“

Tato limita nepracuje jako limita aktivní. Její dosažení pouze signalizuje možný poruchový stav. Hodnota této limity se nastavuje při uvádění do provozu a je to nejnižší možný zátěžný výkon soustrojí. Její podkročení znamená nestandardní stav, který může být způsobený poruchou spojky, převodovky, nebo samotného kompresoru. Proto je nutné na tuto informaci zareagovat kontrolou celého soustrojí, nebo minimálně stroj dlouhodobě sledovat.



Obrázek 54 - Vývojový diagram pasivní limity minimálního výkonu

4.4.4.3. Limita „Dosažení maximálního výkonu“



Obrázek 55 - Vývojový diagram aktivní limity činného výkonu

Překročení činného výkonu může nastat pouze vlivem přetížení ze strany turbokompresoru (pokud neuvažujeme mechanickou závadu na kompresoru, či převodovce; tyto závady by však doprovázely jiné jevy – vibrace, zvýšená teplota...). Pokud je dosaženo této limity (nastavuje se při uvádění do provozu, podle charakteristik činného výkonu kompresoru) a proud statoru je menší, než jmenovitý, budič neprovede žádný regulační zásah, pouze signalizuje nadřazenému systému hlášku „Překročený jmenovitý výkon“. Pokud je proud statoru větší, než jmenovitá hodnota, dochází k odbuzování synchronního pohonného motoru až na $\cos \varphi = 1$. Pokud ani při tomto odbuzení nedojde k poklesu statorového proudu pod hodnotu proudu jmenovitého, dává budič povel k odlehčení kompresoru.

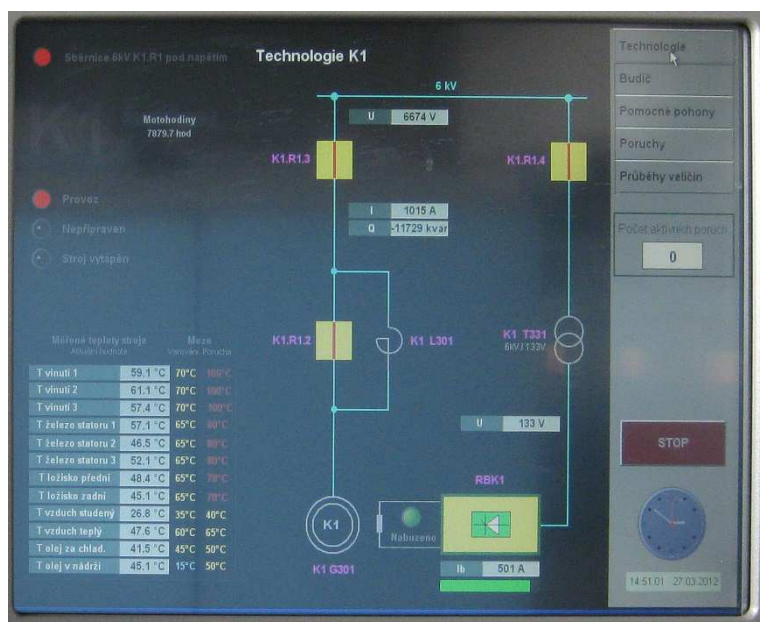
Stejně jako v kapitole 4.4.4.1. „Limita dosažení maximálního proudu“ dochází v tomto regulačním zásahu k nedodržení zadaného účinníku a to, dle zvolené žádané hodnoty, buď účinníku motoru, nebo vzdáleného. Zároveň je vysílána hláška „Nedodržení účinníku“.

4.4.5. Technologický regulátor

Proto, aby mohl budič převzít funkce bloku řízení elektrotechnologie (ovládání elektromotoru, rozběhových komponentů, pomocných pohonů, atp.), musí zajistit dané logické funkce, tj. funkce logického automatu.

Logický automat řídí logické stavy svých výstupů na základě logických hodnot svých vstupů a programu vazeb mezi nimi. Budič má řadu logických informací z technologie (stav hlavního vypínače motoru, stav vypínače rozběhové tlumivky, stavy pomocných pohonů, hodnoty sledovaných technologických veličin a další). Hardwarová koncepce nového regulačního systému budiče PEG xxx/ μ P7 (množství logických vstupů a výstupů) umožňuje implementovat funkci LA do budicího systému a úplně nahradit logický automat elektrotechnologie a přebrat některé úkony regulátoru kompresoru.

Zařízení technologie (čerpadla oleje a chladicí vody, ventilátory chladičů, vn. vypínače a další) je řízeno a ovládáno pomocí beznapěťových kontaktů nebo po komunikační sběrnici.



Obrázek 56 - Technologický snímek vizualizace budiče PEG .500/ μ P7

Vizualizace a ovládání

Ovládání elektrotechnologie, vizualizace logických a analogových veličin je realizovaná pomocí dotykového displeje na operátorském pracovišti, většinou formou technologického schématu, se zobrazením logických stavů v grafické formě a analogových veličin ve formě číselné. Na obr. č. 56 je zobrazení technolo-

gického automatu buzení PEG 500/ μ P7 rotačního kompenzátoru 15 Mvar na dole Lazy, OKD.

Pro ilustraci uvádím výčet požadavků na logické řízení, realizované budičem PEG 250/ μ P7, budící synchronní pohon typu 1 EB 136-49-4, 1,8 MW, v.č. 124 390, pohánějící turbokompresor ETK 4, typ TK16,8-56,7, v.č. 805603, r.v. 1962, 16 000 m³.h⁻¹, v podniku Škoda Energo, Mladá Boleslav, v 05/2016. Uvedený výčet operací převzatý z basic designu rekonstrukce turbokompresoru. Realizace požadavků dále byla zohledněna v prováděcím projektu.

Příprava na spuštění soustrojí

- Spustit pomocné olejové čerpadlo, ověřit tlak mazacího oleje a zkontrolovat průtok oleje ložisky. Spustit odsávání olejových par z nádrže a ložiskových stojanů.
- Otevřít přívody a odpady chladicí vody do mezichladiče a dochlazovačů, odvzdušnit vodní komory mezichladiče a dochlazovačů.
- Otevřít přívody a odpady chladicí vody do chladičů hlavního elektromotoru
- Otevřít přívod chladicí vody do chladiče oleje. Šoupátka na odpadu otevřít až po spuštění soustrojí a ohřátí oleje na 35 °C – 40 °C . Zkontrolovat, zda jde olej přes trojcestný ventil jen do jedné větve filtrů oleje.

Spuštění soustrojí

- Start hlavního poháněcího motoru, vykrácení rozběhové tlumivky
- Odstavení pomocného olejového čerpadla po dosažení plných otáček hlavního elektromotoru soustrojí a jeho funkci převezmou obě hlavní olejová čerpadla
- Za provozu soustrojí seřídít odpady chladicí vody z chladičů oleje tak, aby teplota oleje za provozu byla v rozmezí 38 °C – 42 °C a odpad chladicí vody z mezichladiče seřídít tak, aby oteplení vody bylo cca 6 °C a teplota vystupujícího vzduchu z mezichladiče cca 40 °C až 45 °C.

Normální odstavení

- Vypnout hlavní elektromotor, vypnout zkratovač rozběhové tlumivky
- Po vypnutí motoru okamžitě automaticky startuje pomocné olejové čerpadlo a zajišťuje mazání ložisek při doběhu soustrojí, čerpadlo vypnout cca 20 – 30 minut po doběhu soustrojí
- Uzavřít přívody vody do mezichladiče, dochlazovačů, chladiče motoru a chladičů oleje

Havarijní odstavení

- Vypnout hlavní elektromotor, vypnout zkratovač rozběhové tlumivky
- Po vypnutí motoru okamžitě automaticky startuje pomocné olejové čerpadlo a zajišťuje mazání ložisek při doběhu soustrojí, čerpadlo vypnout cca 20 – 30 minut po doběhu soustrojí
- Uzavřít přívody vody do mezichladiče, dochlazovačů, chladiče motoru a chladičů oleje

Realizace uvedených logických funkcí nahradila instalovaný blok technologie elektro a řízení pomocných pohonů.

4.4.6. Další technologické a mechatronické funkce multifunkčního budiče

Systémy turbokompresorů středních a velkých výkonů (můžeme uvažovat turbokompresory o výkonu nad 10 000 m³/hod, s pohonnými motory nad 1 MW) jsou systémy, navrhované a vyráběné zakázkově, dle požadavků provozovatele. Z toho vyplývá, že každý je jiný, liší se technickým řešením, použitými komponenty, silovým zapojením, prostorovým uspořádáním a mnoha dalšími detaily.

Navrhovaný budič řady μ P7 je otevřený systém, který, kromě vytvořených a popsáných funkcí, umožňuje uživatelsky doplnit funkce další. Požadavky na tyto doplňkové funkce vyplynou při tvorbě prováděcích projektů, či při realizaci zakázky.

Moderní HW platforma umožňuje realizovat řadu doplňkových funkcí, např.:

- sledování, zobrazování a archivaci teplot, tlaků, množství a dalších neelektrických veličin, jež lze převést na elektrický, nebo datový signál. Jejich zobrazení v časovém grafu, spolu s vybranými elektrickými veličinami bývá velmi přínosné,
- black box vybraných analogových a stavových veličin – pomáhá při zjišťování příčin závad, či havárií,
- komunikace a výměna dat s jinými zařízeními systému
 - o ochranami synchronního motoru a kompresoru,
 - o ústřednou sběru dat vibrací systému TK,
 - o ústřednou sběru dat teplot systému TK,
 - o řídicím a nadřazeným systémem,
 - o systémem dálkové správy,
- vzdálený dohled,
- duplicitu některých důležitých ochran a jejich aktivaci a regulační zásah před odstavením pohonu.

Díky širokým uživatelským možnostem je budič řady μ P7 pro projektanty systémů turbokompresorů (jak nově budovaných, tak retrofitových) obrovským přínosem a změnil systém regulace a řízení těchto systémů.

5. Aplikační výsledky disertační práce

Analýzu a vývoj multifunkčního budiče s mechatronickými funkcemi jsem zahájil se započítáním doktorandského studia v roce 2010. Od této chvíle započal návrh hardware, DPS, a silových částí. První silová část nového buzení byla postavena v 4/2012 a začaly zkoušky regulační části s novým software.

Funkční zkoušky nového budícího systému jsem prováděl na modelovém soustrojí (synchronní motor a DC dynamo zatěžované řízeným usměrňovačem v invertorovém chodu do sítě) o výkonu 30 kW. Na tomto soustrojí jsem také analyzoval chování synchronního motoru při prokluzu o pólovou rozteč, která byla základem nové ochrany proti asynchronnímu chodu.

Zároveň jsem zahájil hledání vhodných zákazníků, kde by bylo možno průběžně provozně zkusit výsledky mé výzkumné činnosti na soustrojích velkých výkonů. I když technické možnosti firmy PEG s.r.o. jsou velké, nikdy nenahradí provozní zkoušky celého systému, při jmenovitých parametrech.

Některé z výsledků výzkumu, ověřené provozními zkouškami, uvádím ve své práci (např. kap. č. 4.5.1.).

První nasazení budiče PEG 130/ μ P7 bylo v aplikaci pro napájení bezkontaktního budiče typu RBL 5 synchronního motoru 4 MW, 300 min⁻¹ v závodě innogy, Podzemního zásobníku plynu Dolní Dunajovice. Již zde bylo využito technologického regulátoru pro řízení plynulé regulace výkonu boxerkompresoru. Dále byl budič využit pro komunikaci s ŘS, kde nahradil sadu již značně nepřesných převodníků elektrických veličin. Také byla využita možnost vzdáleného přístupu.

Při tomto projektu byla vyzkoušena i řada funkcí, které nebyly následně v této aplikaci využity. Byly to např. algoritmy podmíněné synchronizace, využití limit regulačních veličin pro regulaci zátěžného stroje a další funkce. Algoritmy podmíněné synchronizace jsem provozně odzkoušel v budícím systému synchronního pohonu kulového mlýna. Výsledky uvádím v kapitole č. 4.5.1.

Na tomto místě je vhodné vyjádřit poděkování firmě innogy Gas Storage, s.r.o., a jejím pracovníkům a technikům za to, že byli ochotní propůjčit technologii a svůj čas pro vývoj nového budícího systému a tedy realizaci cíle této disertační práce.

Aplikační výsledky multifunkčních budiče řady PEG 130/ μ P7 byly realizovány výrobní firmou PEG s.r.o. Praha, která také financovala celý vývoj a výzkum a která počítá s využitím výsledků této práce pro implementaci do svých produktů.

Dále uvádím nejzajímavější řešení a zakázky, ve kterých se uplatnila multifunkčnost budiče řady PEG xxx/ μ P7 a další nové vlastnosti, které vznikly výzkumem, který byl předmětem mé disertační práce.

Cílem následujícího přehledu aplikačních výsledků je ukázat funkční možnosti nově navrženého budícího systému, variabilitu a široké možnosti jejího využití.

Jednalo se především o ostré nasazení tohoto zařízení do technologií. Možnosti zkoušek a hlubšího testování byly omezené programem uvádění do provozu a požadavky na komplexní provozní zkoušky celého zařízení. V drtivé většině aplikací zákazník umožnil pouze základní a nutné zkoušky na prokázání funkčnosti a kontrahovaných parametrů, vyloučil však jakékoliv další vývojové práce a zkoušky. Výsledky uvedené v mé práci jsou z několika aplikací, kde zákazníci umožnili výzkumnou činnost na svém zařízení a patří jim za to dík.

V kapitole 5.1. následuje výčet aplikací, v nichž byl nasazen nový systém buzení PEG xx/ μ P7, s výčtem základních parametrů.

5.1. Projekty, v kterých byly aplikovány výsledky disertační práce

Rok 2013



03/2013

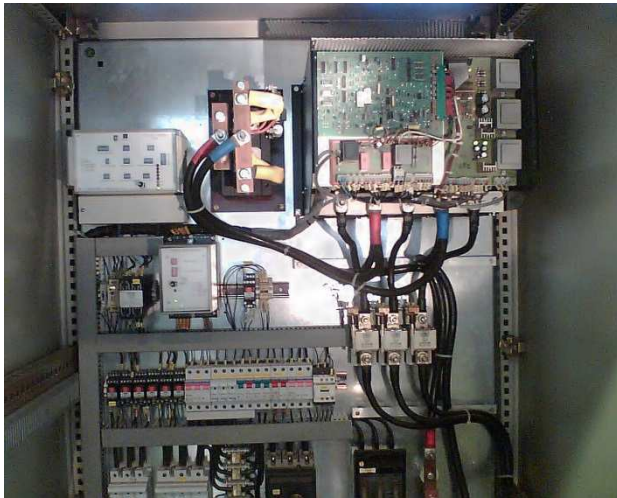
Innogy, PZP Dolní Dunajovice 4x budič PEG 130/μP7, 130 A AC, silová část – jednofázový střídavý regulátor, napájený z odbočky vinutí synchronního motoru, synchronní motor 2B 411-20H, v.č.127502-5, 4 000 kW, 6 kV, 403 A, 300 min⁻¹, buzení 100 V, 275 A, chlazení IWC 37A71, krytí IP 44, 300 min⁻¹, buzení bezkroužkové, rotační budič RBL 5, 380 V, 170 A st., 98 V DC, 275 A DC, chlazení IC 37, krytí IP 44, v.č. 127 506-9.

05/2013

OKD, a.s., důl ČSM Sever, 2x PEG 130/μP7, 130 A AC, silová část – jednofázový střídavý regulátor, napájený z odbočky vinutí synchronního motoru, synchronní motor 2,5 MW, 500 min⁻¹, 2p = 12. Byl využit technologický regulátor pro řízení rozběhu, ovládání HV motoru a rozběhových reaktorů. Technologický regulátor také ovládal řízení deprese důlního ventilátoru



06/2013



Budič synchronního pohonu 3,5 MW turbo-kompresoru, sklárny Kyjov. Řízení vn vypínačů a technologie pomocných pohonů. Subdodávka pro ČKD-DIZ. Komunikace s ŘS, využita funkce vzdáleného dohledu.

Projekt řídil ČKD-DIZ

09/2013



Budič PEG 300/ μ P7, OKD, a.s., důl ČSM Jih, synchronní motor EB 155-66-4, 3500 kW, 1 500 min^{-1} , buzení 295 A, 50 V

Typ EB 155-66-4, 3,5 MW, 150 min^{-1} , buzení 295 A, 50 V, turbokompresor 25 000 $\text{m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$.

Poprvé zde byla vyzkoušena antipompážní ochrana. Budič řídil rozběh a synchronizaci pohonu, obsahoval přepětíovou ochranu rotoru PEG POSM. Z technologického regulátoru budiče byly řízeny pomocné pohony. Vizualizační displej budiče byl využit pro vizualizaci veličin a stavů synchronního motoru – byl zabudován do stávajících rozváděčů motoru.



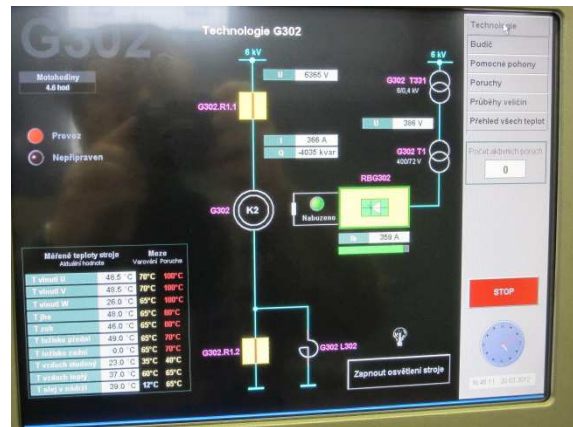
10/2013



HDV důl ČSM Jih, 3B 325-12H, v.č. 127 267, 3,2 MW. Náhrada technologického rozváděče

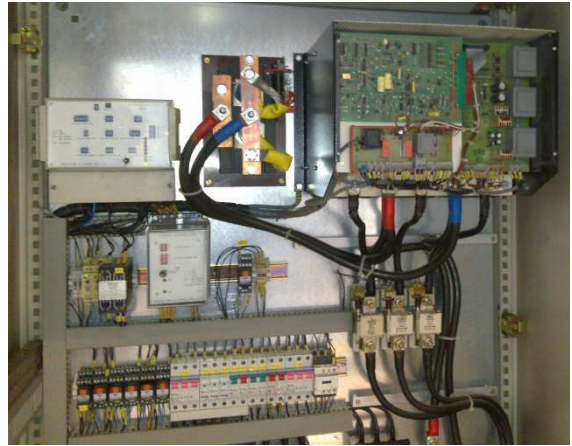
Rok 2014

02/204-08/2014



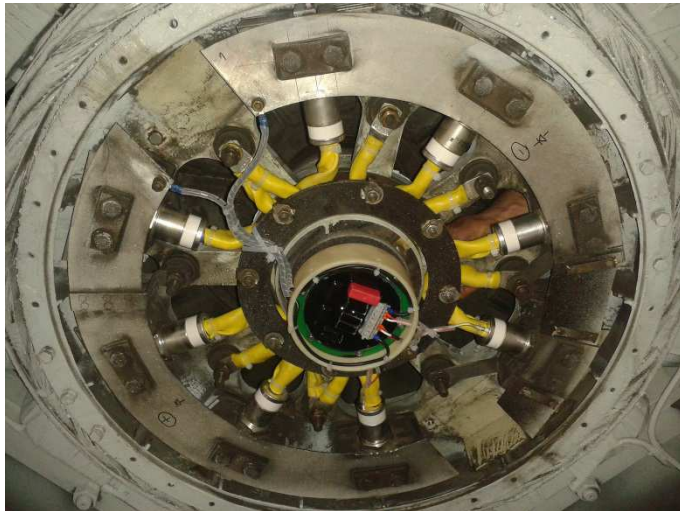
OKD, a.s., důl ČSA, budiče PEG 400/μP7, s implementovaným technologickým regulátorem rotačních kompenzátorů 3x 5 Mvar.

09/2014



Retrofit budiče a technologického regulátoru – Vetropack Kyjov.

11/2014



Fortischem Nováky, náhrada havarované přepětové ochrany rotoru bezkontaktního budiče SBM 1L171-8HC2, v.č. 127 662. Analýza rozběhových parametrů synchronního motoru 32B222-04HW1, v.č. 127 660.

Rok 2015

08/2015



Budič PEG 15µP7 synchronního generátoru 31,5 MVA. Technologický regulátor budiče využit pro funkci automatického fázování a regulace turbíny.

Provozovatel – Cukrovar Sereď



12/2015



Napájecí zdroj bezkontaktního budiče RBL, technologická část budiče ovládá vn část synchronního motoru 2,5 MW, 600 min⁻¹, provozovatel OKD, důl ČSM Jih

Rok 2016

03/2016



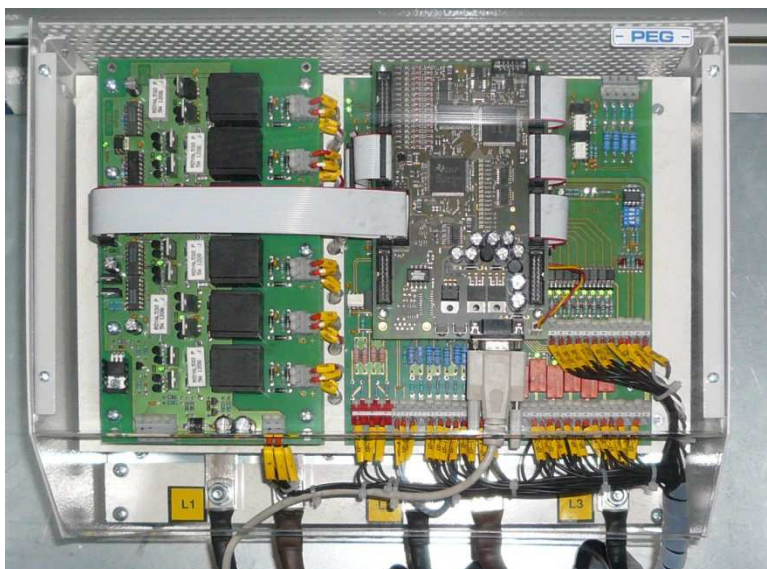
Rekonstrukce zdroje bezkontaktního budiče 1L173-8HW1 – synchronního motoru 32B 222-04HW1, v nevýbušném provedení se stálým přetlakem. Pohon turbokompresoru 16 000 m³·hod⁻¹.

Budič řídí technologii stálého přetlaku a pomocné pohony. Poprvé zde byla vyzkoušena antipompážní regulace (ochrana) řízená z budiče.

06/2016

Air Product – Chemopetrol Litvínov – retrofit budiče ČKD-E – 7 ACN. Synchronní motor 5,5 MW, 10 kV, turbokomresor – vodík, 32 000m³·hod⁻¹ . Budič řídí spouštění motoru a pomocné pohony. Data motoru a pomocných pohonů předává po komunikační lince do centrálního ŘS. Zařízení je v prosotoru nebezpečí výbuchu, fotodokumentace není k dispozici, v areálu pořizování fotografií podléhá speciálnímu povolení.

10/2016

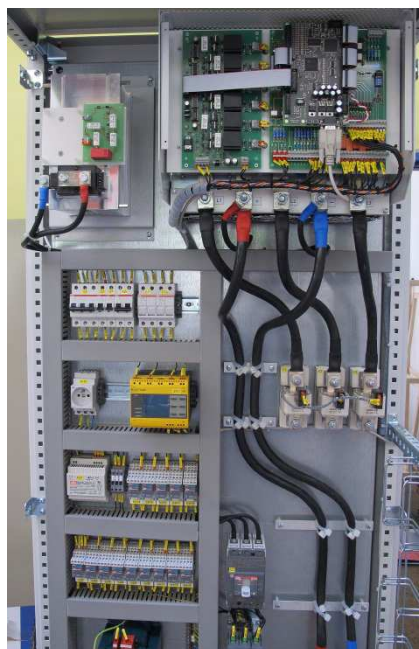


Zkušebna Howden⁴², univerzální budič synchronních motorů W-L soustrojí, používaných na zkušebně kompresorů. Typ PEG 450 μP7 HMI

⁴² Bývalé ČKD Kompresory

Rok 2017

07/2017



Budič PEG 500 μ P7 s přepětovou ochranou rotoru POSM, provozovatel – Chemopetrol Litvínov. Synchronní pohon turbokompresoru 25 000 m³·hod⁻¹ . Spolupráce s regulací kompresoru, komunikace s ŘS, vzdálený dohled.

6. Přehled výsledků disertace, hlavní přínosy disertační práce

Na základě předchozích analýz a výzkumů jsem navrhl podmínky a vlastnosti nového multifunkčního budiče s názvem PEG xxx/ μ P7, a to v následujících bodech:

- základní regulační funkce,
- doplňkové mechatronické funkce,
- konstrukce silové části,
- konstrukce regulační části,
- vizualizace provozních a regulačních stavů.

Zvláštní kapitolu jsem věnoval vývoji nové přepěťové ochrany s komerčním označením PEG POSM, dále jsem také popsal konstrukci budících souprav s budiči PEG xxx/ μ P7.

Na základě výsledků Teoretické analýzy (kapitola 3.2.6.9.) jsem vyhodnotil, že ochrany proti asynchronnímu chodu v současné době vyráběné, jsou nespolehlivé a navrhl jsem novou ochranu PEG 21MD. Ochrana pracuje na zcela novém principu komparace pracovního účinníku. V kapitole 4.4. jsem doložil novost tohoto řešení.

V kapitole 4. analyzuji technologické a mechatronické funkce budiče PEG xxx/ μ P7., jako je např. synchronizace, analýza vibrací, antipompážní regulace, řízení výkonu turbokompresoru s aktivní účastí budiče, logické řízení technologie a možné další mechatronické vlastnosti multifunkčního budiče.

Princip vyhodnocení stavu pompáže z elektrických veličin v buzení synchronního motoru považuji za nový a doposud nepublikovaný. Tuto skutečnost dokládám v kapitole 3.1.4.

Za jeden z přínosů mé disertační práce považuji implementační odzkoušení teoretických závěrů provedeného výzkumu a následnou aplikaci provozních zkušeností zpětně do výsledků výzkumu. V páté kapitole uvádím nejzajímavější aplikace mé výzkumné činnosti, která byla vkomponována do zakázek s nově navrženými budiči. Aplikační výsledky jsou doplněny fotografiemi, ilustrující jednotlivé projekty.

Výjimečné vlastnosti, které popisují ve čtvrté kapitole, dělají z budiče PEGxxx/ μ P7 multifunkční zařízení, které je možné bezesbytku vřadit do mechatronického systému řízení pohonů turbokompresorů se synchronními motory. Možnost vytvořit uživatelské řešení formou změny nastavení a programového vybavení otevírá nové možnosti pro využití v řízení speciálních pohonů, převážně kompresorů, dmychadel a jiných důležitých pracovních strojů. Nový hardware regulačních desek s velkou paměťovou kapacitou, rychlostí a variabilními možnostmi I/O poskytuje prostor pro další vývoj nových funkcí a zákaznických řešení.

Jako velmi přínosnou považuji funkci regulace pompáže turbokompresoru. Princip odvození stavu pompáže z elektrických veličin měřených v budiči je nový a doposud nebyl nikde jiným subjektem publikován a realizován (což dokládám v kapitole 3.1.4.).

Jako výstup mé vědecké práce jsem komplexní řešení, regulační a mechatronické funkce a nové přínosy budícího systému PEG xxx/ μ P7 popsal v odborném článku v časopise Elektro 9/2017.

6.1. Porovnání s existujícím řešením

Existující řešení popisují v kapitole 2. „Přehled současného stavu problematiky“. Systémy řízení turbokompresoru se od sebe navzájem liší dle data jejich realizace, mají však jedno společné: budič je diskrétní systém, který vykonává jen a pouze funkci napájecího zdroje rotoru synchronního motoru. U novějších aplikací zajišťuje zpětnovazební regulaci jalového výkonu (účinníku) dodávaného synchronním motorem. Přesto, že jsou do budiče zavedeny všechny zpětnovazební signály elektrické a řada neelektrických, budič nijak nezasahuje do řídicích procesů kompresoru. Jak již popisují v kapitole 2, řídicí systém kompresoru elektrické i logické vstupy vyhodnocuje znovu. Tím vznikají chyby, nepřesnosti a duplicity. Celý systém tím nabývá na objemu a stává se nepřehledným.

Nový budicí systém přebírá tyto duplicitní funkce a doplňuje je o funkce nové, které rozšiřují regulační vlastnosti systému řízení turbokompresoru a značným způsobem zvyšují bezpečnost jeho provozu (nová ochrana proti asynchronnímu chodu a především antipompážní ochrana).

Velká přednost nového systému je v jeho funkční uživatelské otevřenosti a možnosti implementace nových funkčních nástaveb. Tuto funkční rozšiřitelnost umožňuje hlavně moderní koncepce HW budiče na bázi nejnovějších signálových procesorů firmy Analog Devices řady ADSP-CM408 s nadstandardní paměťovou kapacitou, rychlostí výpočtu a velkým množstvím I/O jak analogových, tak digitálních.

6.2. Zlepšení současného stavu

Nově navržený budič PEG xxx/ $\mu P7$ přináší nový pohled na budicí systém synchronních strojů. Již v úvodu jsem použil srovnání s přechodem od běžných mobilních telefonů k telefonům chytrým, kde „telefonování“ je podružná funkce. Zvláště výzkumem definované nové funkce, které popisují v předchozích kapitolách, dávají konstruktérům a projektantům mocný nástroj pro řešení složitých regulačních úloh v oblasti automatizace procesu stlačování plyných médií.

7. Závěr

7.1. Původní vědecký přínos

Za vědecký přínos mé práce považuji jasné definování funkčních bloků mechatronického budiče (princip antipompážní regulace má přímé komerční uplatnění) a jejich sjednocení do jednoho kompaktního funkčního celku.

7.2. Závěry pro další rozvoj vědy a realizaci v praxi.

Navržený a provozně odzkoušený systém buzení je systém otevřený – tak byl od počátku navržen a připraven pro další funkční možnosti. Zde vidím další možnost pro výzkum a vývoj. Důležitým tématem (a věřím, že i komerčně využitelným) by bylo na základě průběhů statorového proudu sledovat mechanické vlastnosti motoru a dle jeho dlouhodobého vývoje predikovat servisní intervaly, či opravy (US patent) [46]. V budiči jsou k dispozici všechny potřebné signály a je nutné „pouze“ stanovit matematický model a získaným výsledkům přiřadit příslušné akce (havárie, výstrahy, regulační zásahy atp.) Na tomto tématu pracují již několik let výzkumné týmy firmy Danfoss⁴³ v Dánsku a USA [46].

Navržený budicí systém vzniklý téměř osmiletým výzkumem a vývojem dává do ruky mocný nástroj pro projektanty a konstruktéry, kteří nemusí řešit některé požadované funkce dislokovaně, vně mimo stávající řídicí systémy. Budič synchronního motoru, jako multifunkční zařízení dostal, co do využitelnosti, úplně jiný rozměr.

⁴³ Jedna z dominantních firem na trhu s frekvenčními měniči a softstartovými regulátory. Po fúzi s firmou Vacon představuje jednoho z největších hráčů na pohonářském poli.

8. Zhodnocení dosažení cílů disertace

V úvodu této práce jsem si vytýčil cíl, v následujícím členění:

1. Návrh konceptu nového automatizovaného multifunkčního mechatronického budícího systému turbokompresoru
2. Návrh metod ovládání a ochran synchronního motoru (příprava, rozběh, synchronizace, poruchové stavy – asynchronní chod)
3. Analýza provozních a poruchových parametrů soustrojí turbokompresoru z pohledu budícího systému
4. Návrh a analýza vlastností a funkcí nového mechatronického budícího systému a jeho periférií
5. Softwarová implementace automatizovaného řízení turbokompresoru do budícího systému

V kapitole č. 2 a 3 jsem splnil položku cíle č. 2 a 3, v kapitole č. 4 položku cíle č. 1, 4 a 5.

Z právě uvedeného vyplývá, že cíl mé disertační práce jsem splnil.

V Praze, duben 2018.

Ing. Petr Gric, MBA

9. Seznam značek a symbolů

Značka	Název	Jednotka
B	magnetická indukce	T
a	rychlost zvuku	m.s^{-1}
A_c	plocha průřezu potrubím kompresoru	m^2
A_c	plocha průřezu potrubí kompresoru	m^2
A_t	plocha průřezu potrubí škrticího ventilu	m^2
B	Greitzerův parametr stability	-
$\cos \varphi$	účinník	-
$\cos \varphi_C$	kapacitní účinník	-
$\cos \varphi_{C\text{mez}}$	hranice nestability stroje v kapacitním režimu	-
$\cos \varphi_{C\text{max}}$	maximální kapacitní účinník	-
$\cos \varphi_{C\text{min}}$	minimální kapacitní účinník	-
$\cos \varphi_{i\text{mez}}$	hranice nestability stroje v induktivním režimu	-
$\cos \varphi_L$	induktivní účinník	-
$\cos \varphi_{L\text{max}}$	maximální induktivní účinník	-
$\cos \varphi_{L\text{min}}$	minimální induktivní účinník	-
d	průměr	m
E	elektromotorické napětí	V
F	označení tepelné třídy izolace	-
F	Síla	N
f	frekvence	Hz
G	hmotnost (rotoru)	kg
GD^2	moment setrvačnosti	kg.m^2
H	intenzita magnetického pole	A.m^{-1}
h	výška	m
I	proud	A
I_0	proud naprázdno	A
I_b	budící proud	A
I_{b0}	budící proud - hodnota počátečního nabuzení	A
$I_{b\text{max}}$	maximální doraz budícího proudu	A
$I_{b\text{min}}$	minimální doraz budícího proudu	A
I_C	kapacitní složka proudu	A
I_L	induktivní složka proudu	A
I_{sef}	Efektivní hodnota statorového proudu	A
J	moment setrvačnosti	kg.m^2
L	indukčnost	H
l	délka	m
L_c	ekvivalentní délka potrubí kompresoru	m
L_t	ekvivalentní délka potrubí škrticího ventilu	m

M	moment	N.m
m	hmotnost	kg
m	hmotnostní tok	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$
m	hmotnostní tok	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$
M_{\max}	maximální moment	N.m
M_n	jmenovitý moment	N.m
m_s	poměrný moment při synchronních otáčkách	-
M_z	záběrný moment	N.m
m_z	poměrný záběrný moment při nulových otáčkách	-
n	otáčky	min^{-1}
n/n_n	poměrné otáčky	-
N_1	mechanický příkon při tlaku v sání	W
n_n	jmenovité otáčky	min^{-1}
n_s	synchronní otáčky	min^{-1}
N_t	zpoždění v asociaci s formováním buněk rotujícího odtržení proudu	s^{-1}
P	činný výkon	W
p	počet pólových dvojic (pólpárů)	-
p	tlak	Pa
P_1	příkon	W
P_k	tlak na výtlaku	Pa
P_n	jmenovitá výkon	W
p_n	jmenovitý tlak	Pa
P_s	tlak v sání	Pa
Q	jalový výkon	var
Q	množství	$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$
R	odpor	Ω
R_t	poloměr oběžného kola	m
S	zdánlivý výkon	VA
S	plocha (průřez)	m^2
S	skluz	%
T	časový interval	s
t	čas	s
T_m	mechanická časová konstanta	s
U	napětí	V
U_b	budící napětí	V
U_{b0}	budící napětí - hodnota počátečního nabuzení	V
$U_{b\min}$	minimální budící napětí	V
$U_{b\max}$	maximální budící napětí	V
U_f	fázové napětí	V
U_i	indukované napětí	V

U_t	obvodová rychlost	$m.s^{-1}$
V_p	objem pléna	m^3
X	reaktance	Ω
X_C	kapacitní reaktance	Ω
X_L	induktivní reaktance	Ω
β	zátěžný úhel	rad, ($^{\circ}$)
ΔP	ztráty	W
Δp	diferenciální tlak	Pa
Δp	tlaková diference	Pa
ΔU	úbytek napětí	V
$\Delta \vartheta$	teplotní rozdíl	K, $^{\circ}C$
ε	poměr tlaku ve výtlaku a sání kompresoru	-
ε	stlačení	-
ϑ	teplota	K, $^{\circ}C$
ϑ_{max}	maximální povolená teplota	K, $^{\circ}C$
ρ_a	hustota stlačovaného plynu	$kg.m^{-3}$
τ'	časová konstanta	s^{-1}
Φ	bezrozměrný hmotnostní tok	-
φ	fázový posun	rad, ($^{\circ}$)
Φ_c	bezrozměrný hmotnostní tok kompresoru	-
Φ_t	bezrozměrný hmotnostní tok na škrticím ventilu	-
Ψ	bezrozměrné stlačení	-
$\Psi_{c,ss}$	bezrozměrné stlačení při ustáleném stavu	-
Ψ_c	bezrozměrné stlačení kompresoru	-
Ψ_t	bezrozměrný pokles tlaku na škrticím ventilu	-

10. Seznam obrázků

Obrázek 1 - Mezioborová synergie mechatronického pojetí návrhu systému řízení.....	7
Obrázek 2 - Blokové schéma ručního ovládání turbokompresoru.....	9
Obrázek 3 - Nastavení budícího proudu derivačního dynamu.....	10
Obrázek 4 - Pohled na ovládání turbokompresoru 16 000 m ³ /hod, důl ČSM Jih.....	11
Obrázek 5 - Principiální schéma automatiky ovládání kompresoru.....	15
Obrázek 6 - Průběh zátěžného protimomentu při spouštění turbokompresoru v závislosti na otáčkách	26
Obrázek 7 - Blokové schéma regulačního okruhu turbokompresoru.....	29
Obrázek 8 - Regulační charakteristika turbokompresoru (19).....	31
Obrázek 9 - Regulace turbokompresoru škrcením v sání (19).....	33
Obrázek 10 - Charakteristika přechodu do stavu pompáže.....	36
Obrázek 11 - Závislost tlaku a toku média při hluboké pompáži.....	37
Obrázek 12 - Průběh koeficientu toku a stlačení v závislosti na čase.....	38
Obrázek 13 - Stanovení hranice pompáže.....	39
Obrázek 14 - Greitzerův model.....	40
Obrázek 15 - Trendy sledovaných veličin vibrací [26].....	45
Obrázek 16 - Rotační usměrňovač bezkontaktního budiče typu RBL.....	58
Obrázek 17 - Synchronní motor 3,25 MW s budičem typu RBL.....	59
Obrázek 18 - Rotační budič SBM 1L171-08H2, Chemické závody Nováky.....	60
Obrázek 19 - Rotor synchronního motoru 3,2 MW, 2p = 8, s detailem na amortizér s mezipólovými pružnými spojkami.....	61
Obrázek 20 - Schéma zapojení budícího a rozběhového vinutí synchronního pohonu 1 500 kW, 2p = 28 kulového mlýna v Cementárně Ladce.....	62
Obrázek 21 - Rotor synchronního motoru 32B 222-04HW1 bez amortizéru.....	64
Obrázek 22 - Časová závislost skluzu s pro různé velikosti zátěžného momentu.....	65
Obrázek 23 - Asynchronní charakteristika synchronního stroje s různým odporem rotorového obvodu	67
Obrázek 24 - Rozběhové charakteristiky motoru 2B 385-24H, v.č. 127 011, ČKD Elektrotechnika.....	68
Obrázek 25 - detail rozběhových charakteristik motoru 2B 385-24H, v.č. 127 011, ČKD Elektro- technika.....	69
Obrázek 26 - Průběhy proudu statoru a proudu budícího okruhu s rotorem dokrátka a vřazeným odporem - motor 2B 385-24H, v.č. 127 011, ČKD Elektrotechnika.....	69
Obrázek 27 - Ukázka programu pro logické řízení hlavního vypínače motoru.....	72
Obrázek 28- Záznamník poruch ochrany MICOM P241.....	73
Obrázek 29 - Provozní diagram synchronního generátoru 31 MVA.....	75
Obrázek 30 - Blokový diagram základní struktury programu.....	80
Obrázek 31 - Vývojový diagram obsluhy přerušení.....	81
Obrázek 32 - Úvodní obrazovka dotykového panelu statického budiče PEG xxx/uP7.....	86
Obrázek 33 - Blok budiče PEG xxx/μP7, pohled na regulační desku PEG ReDex.....	89
Obrázek 34 - Principiální zapojení POSM pro použití ve spojení s bezkontaktním budičem typu SBM 91	
Obrázek 35 - Rotační budič ČKD-E, typ SBM 1L173-08 HW1 před výměnou POSM.....	92
Obrázek 36 - Rotační budič ČKD-E, typ SBM 1L173-08 HW1 po výměně POSM.....	92
Obrázek 37 - Schéma zkušební přípravky na testování POSM.....	93

Obrázek 38 - Sepnutí POSM ve vrcholové hodnotě napětí.....	93
Obrázek 39 - Průběh spínaného napětí při zvýšení zkušebního napětí	94
Obrázek 40 - Oscilogram rozběhu synchronního stroje s POSM a nulovou diodou	95
Obrázek 41 - PEG POSM ve stacionárním budiči PEG 360/ μ P7, synchronní pohon boxerkompresoru PZP Tvrdonice	96
Obrázek 42 - Náhrada Přepětové ochrany UZP 211 v rotačním budiči RBL.....	97
Obrázek 43 - Pracovní limity ochrany PEG 21 MD	99
Obrázek 44 - Ochrana proti asynchronnímu chodu PEG 21MD bez předního krytu	100
Obrázek 45 - Blokové schéma ochrany PEG 21 MD	101
Obrázek 46 - Princip vyhodnocení hodnoty účinníku.....	103
Obrázek 47 - Rotor synchronního motoru 32B 222-04HW1 bez amortizéru.....	107
Obrázek 48 - Vývojový diagram řízení okamžiku nabuzení.....	108
Obrázek 49 - Diagram č. 1 řízeného nabuzení a synchronizace stroje s těžkým rozběhem	109
Obrázek 50 - Diagram č. 2 řízeného nabuzení a synchronizace stroje s těžkým rozběhem, detail okamžiku synchronizace.....	110
Obrázek 51 - Diagram č. 2 řízeného nabuzení a synchronizace stroje s těžkým rozběhem, upravený okamžik nabuzení, detail okamžiku synchronizace.....	111
Obrázek 52 - Vývojový diagram vyhodnocení stavu pompáže turbokompresoru v budiči řady μ P7 .	115
Obrázek 53 - Vývojový diagram regulace aktivní limity statorového proudu.....	117
Obrázek 54 - Vývojový diagram pasivní limity minimálního výkonu.....	118
Obrázek 55 - Vývojový diagram aktivní limity činného výkonu.....	118
Obrázek 56 - Technologický snímek vizualizace budiče PEG 500/ μ P7.....	119

11. Použitá literatura

- [1] Kolektiv autorů, Automatizace a automatizační technika, Praha : Computer Press, 2014.
- [2] L. Maixner, Mechatronika, Praha: Computer Press, 2006.
- [3] P. Gric, Studie proveditelnosti dálkového řízení TK v provozech Dalkia - OKD, Praha: OKD, 2012.
- [4] P. Gric, Studie využitelnosti výkonové rezervy synchronních strojů důlních ventilátorů pro kompenzaci jalové energie provozu OKD, Praha: OKD, 2011.
- [5] ABB, „Advant OCS,“ *ABB Advant Energy Management Systems*, č. 3BNL ITC 001 RB10, 01/1998.
- [6] Brush Prismic, „Prismic - Power Management Systems,“ *Produktová informace*, 12/2010.
- [7] Brush Turbogenerators Ltd., „Prismic A3100, The most advanced solution for brushless excitation control,“ *Produktová informace*, 2001.
- [8] Brush electrical Machines Ltd., „Prismic A50 Excitation Controller,“ *Produktová informace*, 2014.
- [9] Brush turbogenerators Ltd., „Brush Prismic A12, Excitation System, Product Specification,“ *Produktová informace*, 01/2011.
- [10] ABB, „Motor Protection and Control REM 630,“ *Application Manual*, č. 1MRS756785 F, 2016.
- [11] A. CZECH, „MICOM P241 - ochranná a ovládací jednotka motoru,“ 2006.
- [12] Dohnálek, Ochrana synchronních strojů D21, Mladé Buky: Katalogový list, 2010.
- [13] P. Dohnálek, Provoz a údržba ochrany v energetice, Praha : SNTL, 1989.
- [14] ABB Oy, Medium Voltage Product, „630 Series, Relion Protection and Control,“ *Technical Manual*, 2014.
- [15] s. Schneider Electric CZ, Ochrany Micom, Schneider Electric s.r.o., 2015.
- [16] Schneider Electric CZ, s.r.o.; „Ochrany Micom, základní vlastnosti vn ochran řady 20, 30 a 40,“ *Technický popis*, č. S1144, 03-2012.
- [17] P. Gric, Zkoušky a uvádění do provozu ochrany proti asynchronnímu chodu D 21, Praha 9: Interní dokument Zkušebny točivých strojů VES-Z 18455, 1987.
- [18] M. P. Boyce, Gas Turbine Engineering Handbook, Boston: Gulf Professional Publishing, ISBN-13: 978-0-8841-5732-8, 2015, Second Edition.
- [19] D. Misárek, Turbokompresory, Praha: SNTL Praha, 1963.
- [20] Diesel and gas turbine publications, Compression technology 2015, Waukesha, USA: Diesel and gas turbine publications, 2015.

- [21] Diesel and gas turbine publications, Compression technology 2016, Waukesha, USA: Diesel and gas turbine publications, 2016.
- [22] Diesel and gas turbine publications, Compression technology 2017, Waukesha, USA: Diesel and gas turbine publications, 2017.
- [23] J. Oldřich, Radiální kompresory, Praha: Howden, interní studijní materiál, 2014.
- [24] M. Guzej, Rotující odtržení v prostoru odstředivého kompresoru, Brno: VUT v Brně, 2011.
- [25] P. Kopáček, Současná konstrukční řešení rotačních kompresorů, prevence jejich pompáže, Brno: VUT v Brně, 2009.
- [26] J. Biloš a A. Bilošová, Vibrační diagnostika, Ostrava: VŠB - TU Ostrava, fak. strojní, 2012.
- [27] P. Gric, Určování zdroje vibrací z obsahu vyšších harmonických, VES-Z 15524, Praha 9: Interní dokument Zkušebny točivých strojů elektrických ČKD - E, 1987.
- [28] M. L. Adams, Rotating Machinery Vibration, New York: CRC Press, ISBN 978-1-4398-0717-0, 2010.
- [29] ČSN ISO 10816 - Hodnocení vibrací na základě měření na nerotujících částech, soubor norem, Praha: ÚNMZ, ČNI, 03/1998.
- [30] ČSN ISO 1940 - Požadavky na jakost vyvážení rotorů v konstantním (tuhém) stavu - soubor norem, Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [31] ČSN ISO 1925 (011401) Vibrace - vyvažování, soubor norem, Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [32] G. N. Petrov, Elektrické stroje 2, Praha: Academia, 1984.
- [33] I. Brand a V. Hrbek, Montáž, provoz a údržba asynchronních a synchronních strojů, Praha: SNTL, 1959.
- [34] L. Cigánek, Elektrické stroje, Praha: Technicko-vědecké nakladatelství, 1951.
- [35] J. Pavelka, J. Čeřovský a J. Javůrek, Elektrické pohony, Praha: Skripta ČVUT, 1999.
- [36] K. Blábol a Hak Josef, Elektrické stroje I, Praha : SNTL, 1953.
- [37] J. Pavelka, Vliv diody v budícím obvodu na synchronizaci synchronního motoru, Praha: Sborník ČSVTS, 1990.
- [38] J. Pavelka, Vliv polovodičového budiče na chování synchronního motoru při jeho synchronizaci, Praha: Elektro 1993/2, str. 52-55, 1993.
- [39] Z. Šnobl a a kol., Protokol o typové zkoušce synchronního motoru 2B 385-24H, 6-VES-Z 5744, Praha 9: Interní dokument ČKD Elektrotechnika, 1985.

- [40] ČSN 33 3051 Ochrany elektrických strojů a zařízení, Praha : Český normalizační institut, 1992.
- [41] A. T. SA, „Micom P241-243 - komplexní ochrana motoru, technická příručka,“ 2006.
- [42] S. E. I. SAS, Protection Relays MICOM P24x, Schneider Electric Industries SAS, 2011.
- [43] S. Voráč, 160329 PEG 21 MD, Popis a uvedení do provozu ochrany proti asynchronnímu chodu PEG 21 MD, Praha: Interní dokument PEG s.r.o., 2016.
- [44] K. V. Jelínek J., Budící systémy synchronních strojů ČKD, Praha: Sborník ČSVTS, 1990.
- [45] P. Gric a S. Voráč, Zkušební předpis PEG POSM, Praha: PEG s.r.o., 2014.
- [46] K. P. Simon, Method for detecting a fault in an induction machine, United States Patent, 09/2013.
- [47] I. Z. Boguslavskij, V. J. Vejgandt a V. G. Kuzenkov, Budiče synchronních strojů v závodě Elektrosila, Praha: Sborník ČSVTS, 1990.
- [48] P. Hlaváč a M. Přerost, Budící soustava turboalternátoru 100 MW, Praha: Sborník ČSVTS, 1990.
- [49] O. Křenková, Těžká synchronizace a vliv budící soustavy, Praha: Sborník ČSVTS, 1990.
- [50] J. Měřička a Z. Zoubek, Obecná teorie elektrického stroje, Praha: SNTL, 1973.
- [51] J. Oeter, Výkonová elektronika pre elektrické pohony, Bratislava: Alfa, 1988.
- [52] V. Zimin, M. Kaplan a M. Palej, Obmotki elektrických mašin, Leningrad: Energia, 1975.
- [53] J. Čapoun, J. Pavelka a J. Ryant, Elektrické regulační pohony s tyristory, Praha: SNTL, 1981.
- [54] J. Haškovec, F. Lstibůrek a J. Zíka, Tyristory, Praha: SNTL, 1972.
- [55] F. Čadil, V. Anderle, J. Holan a J. Kule, Elektrické pohony, Praha: SNTL, 1973.
- [56] J. Bádál, J. Parlesák a P. Popov, elektrické pohony s tyristory, Praha : SNTL, 1970.
- [57] E. Wiedemann a W. Kellenberger, Konstrukce elektrických strojů, Praha: SNTL, 1973.
- [58] J. Kučera a J. Hapl, Vinutí elektrických strojů točivých, Praha: Nakladatelství ČSAV, 1959.
- [59] J. Vladař a J. Zelenka, Elektrotechnika a silnoproudá elektronika, Praha: SNTL, 1986.
- [60] J. Hormann a Z. Průša, Technická mechanika pre silnoproudou elektrotechniku, Bratislava: Alfa, 1985.
- [61] J. Zíka, Diody a tyristory v průmyslové elektronice, Praha: SNTL, 1981.
- [62] P. Koblíček a J. Pavelka, Elektrické pohony a jejich řízení, Praha: ČVUT, 2016.