

KATEDRA ENERGETIKY

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V PRAZE**



**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
VLIV ZPŮSOBU VÝPOČTU
NA STATICKOU STABILITU
VELKÉHO TURBOGENERÁTORU**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

KVĚTEN 2022

BC. LUKÁŠ HAVEL



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Havel** Jméno: **Lukáš** Osobní číslo: **474411**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra elektroenergetiky**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Specializace: **Elektroenergetika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Vliv způsobu výpočtu na statickou stabilitu velkého turbogenerátoru

Název diplomové práce anglicky:

Effect of calculation method on the static stability of large turbogenerator

Pokyny pro vypracování:

1. Pracovní oblast turbogenerátoru včetně omezení statickou stabilitou
2. Výpočet statické stability zjednodušenou metodou z fázorového diagramu
3. Zpřesněný výpočet statické stability pomocí dynamické simulace
4. Zhodnocení výsledků pro obě metody výpočtu

Seznam doporučené literatury:

- [1] TROJÁNEK, Zdeněk, Josef HÁJEK a Pavol KVASNICA. Přechodné jevy v elektrizačních soustavách. 1. vyd. Praha: Nakladatelství techn. lit., 1987.
- [2] MÁŠLO, Karel a kol., Řízení a stabilita elektrizační soustavy, ISBN 978-80-260-44671-1.
- [3] HODINKA, Miloslav. Přechodné jevy v elektrizační soustavě. Vyd. 3. Brno: Ediční středisko Vysokého učení technického, 1990.
- [4] ZIMA, Josef. Elektrárny II. 1. vyd. Praha: Ediční středisko Českého vysokého učení technického, 1984.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Pavel Fajgl, ÚJV Řež, a.s.

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **10.12.2021** Termín odevzdání diplomové práce: _____

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2023**

Ing. Pavel Fajgl
podpis vedoucí(ho) práce

_____ podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

_____ Datum převzetí zadání

_____ Podpis studenta

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu Ing. Pavlu Fajglovi za vstřícné a odborné vedení mé diplomové práce. Dále děkuji kolegům za poskytnuté cenné rady, konzultace a rovněž společnosti ÚJV Řež, a. s. za poskytnutí podkladů a umožnění využití výpočetního softwaru.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval/a samostatně a že jsem uvedl/a veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 19. května 2022

.....

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá analýzou vlivu použití různých výpočtových metod na statickou stabilitu velkých turbogenerátorů. V úvodních částech práce jsou stručně popsány funkce a principy činnosti turbogenerátorů, problematika statické stability a stanovení pracovní oblasti turbogenerátoru. Ve druhé části práce je odvozen vztah pro výpočet křivky statické stability fázorovou metodou, zahrnující meziodběr výkonu vlastní spotřebou a vliv reaktance přenosové soustavy. Použitím odvozených vztahů je spočtena statická stabilita generátoru pro 1. blok jaderné elektrárny Temelín. Ve třetí části následuje výpočet křivky statické stability stejného turbogenerátoru dynamickou simulací ve výpočetním programu NEPLAN, využívající vytvořený model elektrizační soustavy ČR. Porovnání výsledků výpočtových metod ukazuje, že fázorová metoda udává, především při práci generátoru s vysokým činným výkonem, přísnější omezení statickou stabilitou a omezuje schopnost práce v podbuzeném stavu.

Klíčová slova: Turbogenerátor, statická stabilita, fázorová výpočetní metoda, dynamický výpočet, NEPLAN, PQ diagram

ABSTRACT

The scope of this thesis is to analyze the effect of different calculation methods on the static stability of large round rotor generators. The prefatory part of the thesis describes the function principles of round rotor generators, as well as static stability and capability curve theories. In the second part of the thesis, phasor method based static stability formula is derived, including the plant self-consumption of true power, and the power system reactance effect. Using the derived formula, the static stability of Temelin nuclear power plant's first unit is calculated. Within the third part, the static stability of the exact same round rotor generator is calculated by the RMS stability analysis in the NEPLAN software, using the developed model of Czech Republic's power system. Comparing the results of used calculation methods show that the phasor method, especially when the generator is operating with high active power, gives a more stringent static stability restriction and significantly limits the ability to operate in an under excited state.

Keywords: Round rotor generator, static stability, phasor calculation method, RMS dynamic analysis, NEPLAN, capability curves diagram

OBSAH

OBSAH	1
SEZNAM OBRÁZKŮ	3
SEZNAM TABULEK	4
1. ÚVOD	5
2. TURBOGENERÁTOR	6
2.1 PRINCIP ČINNOSTI.....	6
2.2 BUDÍCÍ SYSTÉMY.....	10
3. STABILITA ELEKTRIZAČNÍCH SOUSTAV	11
3.1 DEFINICE STABILITY.....	11
3.2 STATICKÁ STABILITA.....	12
4. PRACOVNÍ OBLAST TURBOGENERÁTORU	17
4.1 OMEZENÍ DANÁ GENERÁTOREM.....	17
4.2 OMEZENÍ TURBÍNOU.....	19
4.3 OMEZENÍ STATICKOU STABILITOU.....	20
4.4 OMEZENÍ MAXIMÁLNÍM NAPĚTÍM PŘENOSOVÉ CESTY A SOUSTAVY.....	20
4.5 OMEZENÍ MINIMÁLNÍM NAPĚTÍM VLASTNÍ SPOTŘEBY.....	21
5. VÝPOČTOVÝ MODEL	22
5.1 GENERÁTOR.....	22
5.2 BLOKOVÝ TRANSFORMÁTOR.....	24
5.3 ODBOČKOVÝ TRANSFORMÁTOR.....	25
5.4 VLASTNÍ SPOTŘEBA.....	25
5.5 VEDENÍ.....	25
5.6 SOUSTAVA.....	26
5.7 FÁZOROVÝ DIAGRAM.....	26
6. VÝPOČET STATICKÉ STABILITY FÁZOROVOU METODOU	28
6.1 PŘEDPOKLADY.....	28
6.2 NÁHRADNÍ SCHÉMA.....	29
6.3 FÁZOROVÝ DIAGRAM.....	30
6.4 ODVOZENÍ VZORCE STATICKÉ STABILITY.....	31
6.5 ODVOZENÍ KŘIVEK PRO U_G , $U_S = \text{KONST}$	35
6.6 ODVOZENÍ KŘIVEK PRO $U_R = \text{KONST}$	38
6.7 ODVOZENÍ U_G PRO MINIMÁLNÍ PŘÍPUSTNÉ NAPĚTÍ VLASTNÍ SPOTŘEBY.....	39
6.8 PQ DIAGRAMY – FÁZOROVÁ METODA.....	42
7. DYNAMICKÝ VÝPOČET STATICKÉ STABILITY	46
7.1 VÝPOČTOVÝ PROGRAM.....	46

7.2	PARAMETRY	46
7.3	ZPŮSOB VÝPOČTU	48
7.4	VÝSLEDKY VÝPOČTU.....	49
7.5	PQ DIAGRAMY – DYNAMICKÝ VÝPOČET	54
8.	SROVNÁNÍ VÝPOČTOVÝCH METOD	58
8.1	PQ DIAGRAMY – SROVNÁNÍ.....	58
9.	ZÁVĚR.....	62
	POUŽITÁ LITERATURA	64
	SEZNAM PŘÍLOH.....	66

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2-1: Fázory působící na fázi A statorového vinutí (Obr. 5 v [7])	8
Obr. 2-2: Náhradní schéma turbogenerátoru (obr. 6.6 v [9]).....	9
Obr. 2-3: Fázorový diagram turbogenerátoru (obr. 6.7 v [9])	10
Obr. 3-1: Rozdělení stability ES (obr. 3.5 v [2]).....	12
Obr. 3-2: Náhradní schéma přenosu zdánlivého výkonu přes reaktanci (obr. 2-1 v [24]).....	13
Obr. 3-3: Fázorový diagram přenosu výkonu přes reaktanci (obr. 2-2 v [24])	14
Obr. 3-4: Výkonová charakteristika statické stability	15
Obr. 4-1: PQ diagram omezení strojem [25].....	18
Obr. 4-2: Závislosti omezení budícím proudem na tlaku vodíku ve stojci (obr. 2.36 v [6]).....	19
Obr. 5-1: Blokové schéma regulátoru buzení (obr. 1 v [17]).....	24
Obr. 5-2: Fázorový diagram generátoru.....	27
Obr. 6-1: Schéma vyvedení výkonu.....	28
Obr. 6-2: Náhradní schéma vyvedení výkonu	29
Obr. 6-3: Fázorový diagram pro odvození statické stability.....	30
Obr. 6-4: Zjednodušený fázorový diagram.....	36
Obr. 6-5: Náhradní schéma trojvinutového transformátoru.....	40
Obr. 6-6: PQ diagram - $U_s = 420$ kV.....	43
Obr. 6-7: PQ diagram - $U_s = 410$ kV.....	44
Obr. 6-8: PQ diagram - $U_s = 400$ kV.....	45
Obr. 7-1: Model budícího systému ST4B (obr. 7-4 v [23]).....	47
Obr. 7-2: Model systémového stabilizátoru PSS3B (obr. 8-3 v [23])	48
Obr. 7-3: Průběh Q_g a U_g - 420 kV	50
Obr. 7-4: Průběh β_c - 420 kV.....	50
Obr. 7-5: Průběh Q_g a U_g - 410 kV	51
Obr. 7-6: Průběh β_c - 410 kV.....	51
Obr. 7-7: Průběh Q_g a U_g - 400 kV	52
Obr. 7-8: Průběh β_c - 400 kV.....	52
Obr. 7-9: PQ diagram - $U_s = 420$ kV.....	55
Obr. 7-10: PQ diagram - $U_s = 410$ kV	56
Obr. 7-11: PQ diagram - $U_s = 400$ kV.....	57
Obr. 8-1: Srovnávací PQ diagram - $U_s = 420$ kV.....	59
Obr. 8-2: Srovnávací PQ diagram - $U_s = 410$ kV.....	60
Obr. 8-3: Srovnávací PQ diagram - $U_s = 400$ kV.....	61

SEZNAM TABULEK

Tab. 5-1: Jmenovité parametry generátoru [5].....	22
Tab. 5-2: Jmenovité parametry budícího generátoru [17].....	23
Tab. 5-3: Parametry blokového transformátoru [18].....	24
Tab. 5-4: Parametry odbočkového transformátoru [18].....	25
Tab. 5-5: Parametry vlastní spotřeby	25
Tab. 5-6: Parametry vedení [19].....	25
Tab. 7-1: Vybrané parametry regulátoru buzení ST4B [21].....	47
Tab. 7-2: Vybrané parametry stabilizátoru [22]	48
Tab. 7-3: Výsledky dynamických simulací.....	53

1. ÚVOD

Schopnost správně určit výkonové schopnosti paralelně pracujících generátorů je důležitou vlastností pro bezpečný a spolehlivý provoz přenosových soustav, a to především v dnešní době, kdy jsou na přenosovou soustavu kladeny stále vyšší nároky z důvodu připojování obnovitelných zdrojů a vyšších požadavků na spolehlivost a kvalitu dodávek elektrické energie.

Parametrem, důležitým pro udržení stabilního stavu přenosové soustavy, je statická stabilita soustavy a pracujících generátorů. Správné stanovení meze statické stability je klíčové pro zajištění udržení stability paralelního chodu generátorů v soustavě.

Způsobů stanovení meze statické stability je několik. Mezi nejjednodušší patří použití vzorce, odvozeného ze statického fázorového diagramu generátoru (dále fázorová metoda). Ta však vychází ze značných zjednodušení a nereflexuje např. vliv regulace buzení.

Dnešní výpočetní technologie již umožňují simulovat chování rozsáhlých elektrických soustav pro přesné stanovení křivek statické stability. Výpočetních programů, umožňujících provádění dynamických výpočtů, existuje na trhu velké množství.

Hlavním cílem této diplomové práce je analyzovat vliv použité výpočetní metody na statickou stabilitu.

Analýza vlivu použité metody je provedena pro výpočet pomocí zjednodušené fázorové metody a pomocí dynamické simulace ve výpočetním programu NEPLAN.

Jako referenční velký turbogenerátor, sloužící pro porovnání, je použit generátor prvního výrobního bloku Jaderné elektrárny Temelín, který je se svým výkonem 1 250 MVA největším instalovaným generátorem v ČR.

2. TURBOGENERÁTOR

Turbogenerátor je jeden z možných provedení synchronního stroje, tedy zařízení sloužícího k přeměně mechanické energie hnacího ústrojí na energii elektrickou. Dalším typem je hydrogenerátor. Oba typy strojů se skládají ze dvou částí: statoru a rotoru. Hlavní rozdíl je ve tvaru rotoru, v případě turbogenerátoru je rotor hladký a u hydrogenerátorů se používá rotor s vyniklými póly.

Stator turbogenerátoru je nepohyblivá část, tvořená kostrou stroje a střídavým vinutím, umístěným v drážkách. Statorové vinutí je tvořeno třemi cívkami (každá pro jednu fázi), které jsou vzájemně posunuté o 120°. Kostra (železo) stroje je složena z izolovaných plechů [9].

Rotor je v případě turbogenerátoru hladký, tzn. šířka vzduchové mezery mezi statorovou a rotorovou částí je po celém obvodu téměř stejná. Budící, stejnosměrně napájené vinutí, je u hladkých rotorů tvořeno rozloženými cívkami, umístěnými do drážek. Součástí rotoru může být dále rozběhové nebo tlumící vinutí. Rotor je na umístěn na společné hřídeli s turbínou, která rotorem otáčí [4].

Turbogenerátory pracují s velkými obvodovými rychlostmi. Velké rychlosti otáčení vyžadují účinný odvod tepla. U strojů velkých výkonů již nestačí odvod tepla ventilací a používají se účinnější chladiva – vodní, příp. vodíkové chlazení. Vysoké otáčky rovněž způsobují značné mechanické namáhání, proto se užívají rotory velkých délek a malých průměrů [9].

Turbogenerátory se nejčastěji konstruují jako dvoupólové, případně čtyřpólové. Pro synchronní stroje platí pro otáčky následující vztah:

$$n = \frac{60 * f}{p_p} \quad (2-1)$$

kde:

n rychlost otáčení rotoru [1/min]

f frekvence napětí sítě [Hz]

p_p počet pólových párů (*pro dvoupólový stroj = 1, atd.*) [-]

Pro dvoupólový stroj a frekvenci 50 Hz je rychlost otáčení 3000 otáček za minutu, pro 60 Hz pak 3600 otáček za minutu. Toto provedení se využívá pro elektrárny velkých výkonů s parním cyklem u nás i ve světě.

2.1 Princip činnosti

Při vyšetřování principů činnosti turbogenerátorů se vychází z předpokladu, že vodivost magnetického obvodu je stálá, tzn. vzduchová mezera je po obvodu stroje konstantní. To platí, pokud zavedeme následující zjednodušující předpoklady:

- zanedbání vlivu drážkování,

- zanedbání vlivu různé magnetické indukce na obvodu rotoru

V otáčejícím se rotoru, jehož vinutím protéká stejnosměrný proud, dochází k vybuzení rotujícího magnetického toku. ten vytváří magnetomotorickou sílu F_f , jejíž velikost je závislá na velikosti budícího proudu i_f , počtu závitů budícího vinutí N_{Fd} a rozložení drážek po obvodu tělesa rotoru (úhel α mezi 2 sousedícími drážkami) [7].

Velikost této magnetomotorické síly ve směru osy d stroje je dána vzorcem:

$$F_f = N_{Fd} * i_f * (1 + 2 \cos \alpha + 2 \cos 2\alpha) = N_{fc} * i_f \quad (2-2)$$

Tato magnetomotorická síla vyvolá magnetický tok Φ_f , jež se uzavírá magnetickým obvodem a jeho velikost je dána Hopkinsonovým zákonem jako:

$$\Phi_f = \frac{F_f}{R_m} = \frac{N_f * i_f}{R_m} \quad (2-3)$$

kde R_m reprezentuje reluktanci cesty magnetického toku. Za reluktanci mag. obvodu se často uvažuje pouze reluktance vzduchové mezery, reluktance železa je mnohonásobně menší a lze ji proto zanedbat. Stejně tak se zanedbává rozptylový magnetický tok, který se uzavírá tělesem rotoru, jehož velikost činí maximálně jednotky procent hodnoty Φ_f . Zbytek představuje mag. tok Φ_{fa} , který vyvolává spřažený magnetický tok Ψ_{fa} s jednotlivými statorovými vinutími [7].

Pro velikost spřaženého toku lze získat ze vzorce:

$$\Psi_{fa} = M * i_f * \cos(\omega t) \quad (2-4)$$

M představuje vzájemnou indukčnost mezi rotorem a státorem, a platí:

$$M = \frac{N_A * N_F * k_A * k_F}{R_m} \quad (2-5)$$

kde N_A , N_F jsou počty závitů statorového a rotorového vinutí a k_A , k_F jím příslušné součinitele vinutí. Vzorec pro výpočet velikosti spřaženého toku platí pro fázi A statoru. Pro fáze B a C platí obdobný vzorec, pouze prostorově posunutý o $\pm 2\pi/3$.

Spřažené toky $\Psi_{fA(B,C)}$ indukují dle Faradayova zákona v jednotlivých fázích elektromotorické napětí $e_{A(B,C)}$, jehož velikost se získá jako záporně vzatá časová derivace spřaženého toku příslušného vinutí.

$$e_A = -\frac{d\Psi_{fA}(t)}{dt} = M * \omega * i_f * \sin(\omega t) \quad (2-6)$$

$$\hat{E}_{fA} = -\frac{d\hat{\Psi}_{fA}(t)}{dt} = -j * \omega * \hat{\Psi}_{fA} \quad (2-7)$$

a obdobně pro fáze B a C.

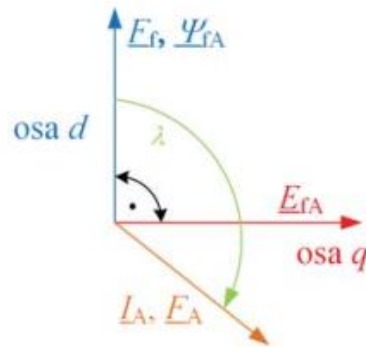
2.1.1 Vliv reakce kotvy

Princip činnosti, popsany v kapitole 2.1, definuje napětí, které se indukuje do fázových vinutí statoru. To ovšem platí pouze pro chod naprázdno. Ve skutečnosti jsou statorová vinutí připojena k zátěži a protéká jimi proud, díky čemuž dojde ke změně poměrů ve stroji. Tato změna je označována jako reakce kotvy (v případě generátoru statoru stroje) [7].

Pro možnost popsat danou změnu rovnicemi budeme uvažovat, že zátěž připojená na svorky generátoru je symetrická ve všech fázích a je dána pouze indukčností (odpor zátěže zanedbáme). Pak proudy protékající fázemi statorového vinutí budou mít amplitudu I_m a budou zpožděny za magnetickým tokem o úhel λ [7]. To lze vyjádřit vztahem:

$$i_A(t) = I_m * \cos(\omega t - \lambda) \quad (2-8)$$

a opět obdobně pro fáze B a C statorového vinutí. Na Obr. 2-1 jsou vyneseny fázory jednotlivých veličin a jejich vzájemná poloha ve fázi A.



Obr. 2-1: Fázory působící na fázi A statorového vinutí (Obr. 5 v [7])

Proud popsany rovnicí (2-8) vyvolá ve vinutí statoru pulsující magnetomotorickou sílu, pro kterou platí:

$$F_A = N_A * k_A * i_A(t) \quad (2-9)$$

Magnetomotorická síla statoru se následně získá součtem průmětů fází B a C do fáze A, kterou považujeme za referenční. Geometrické posunutí fází lze popsat rovnicemi:

$$F_S = F_A + F_B \cos\left(-\frac{2\pi}{3}\right) + F_C \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) = F_A - \frac{1}{2}F_B + \frac{1}{2}F_C \quad (2-10)$$

$$F_S = \frac{3}{2} * N_A * k_A * I_m * \cos(\omega t - \lambda) \quad (2-11)$$

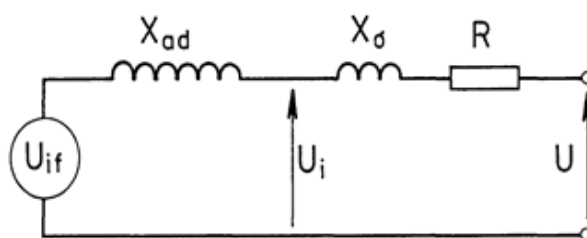
$$\hat{F}_S = \frac{3}{2} * N_A * k_A * I_m * e^{-j\lambda} \quad (2-12)$$

Výsledná magnetomotorická síla generátoru se spočítá jako vektorový součet magnetomotorické síly rotoru F_f z rovnice (2-2) a magnetomotorické síly statoru z rovnice (2-12). Platí tedy:

$$\hat{F}_C = \hat{F}_f + \hat{F}_S \quad (2-13)$$

2.1.2 Náhradní schéma turbogenerátoru

Pro analýzu dějů v generátoru se často využívá náhradní schéma. Za předpokladu, že vzduchová mezera stroje je po celém obvodu konstantní, a tedy platí $X_d = X_q$, magnetomotorická napětí statoru jsou v prostoru rozložena sinusově a permeabilita vzduchu je konstantní, pak lze náhradní schéma sestavit dle Obr. 2-2,



Obr. 2-2: Náhradní schéma turbogenerátoru (obr. 6.6 v [9])

a popsat následující rovnicí:

$$\hat{U} = R * \hat{I} + j * X_{\sigma} * \hat{I} + j * X_{ad} * \hat{I} + \hat{U}_{if} \quad (2-14)$$

kde:

Ufázor napětí na svorkách stroje

U_i.....fázor napětí indukovaného výsledným magnetickým tokem

U_{if}.....fázor vnitřního elektromotorického napětí stroje

X_{ad}magnetizační reaktance

X_σ.....rozptylová reaktance

R.....rezistance statorového vinutí

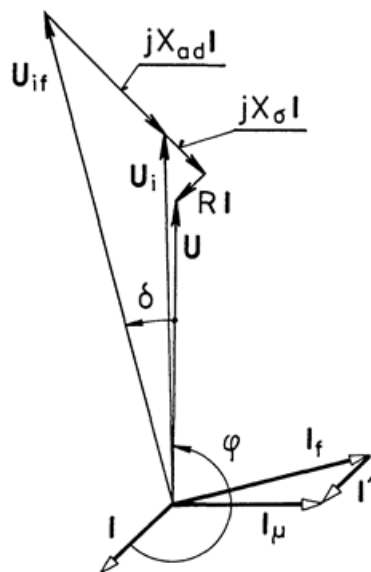
I.....fázor statorového proudu

V praxi se velmi často používá součet magnetizační a rozptylové reaktance, tzv. synchronní reaktance, označovaná jako X_d, pro kterou platí:

$$X_d = X_{ad} + X_{\sigma} \quad (2-15)$$

2.1.3 Fázorový diagram turbogenerátoru

Další způsob používaný pro popis generátorů je fázorový diagram. Ten lze sestavit z napěťové rovnice pro daný stroj, získané z náhradního schématu. Fázorový diagram pro rovnici (2-14) je sestaven na Obr. 2-3.



Obr. 2-3: Fázorový diagram turbogenerátoru (obr. 6.7 v [9])

2.2 Budící systémy

Budící systém je nedílnou součástí příslušenství turbogenerátoru, jehož úkolem je dodávat stejnosměrný proud do budícího vinutí rotoru. Je to technologický celek, složený z následujících komponent:

- budič (zdroj budícího proudu),
- regulátor,
- odbuzovač.

Primárním úkolem budícího systému je udržovat konstantní napětí na svorkách generátoru, které se vlivem proměnné zátěže při provozu mění. V případě změny odebíraného výkonu se změní velikost proudu v obvodu kotvy, a tedy i úbytek napětí na reaktanci generátoru [24].

Dle rovnice (2-14) způsobí změna úbytku na reaktanci změnu svorkového napětí stroje, kterou je však potřeba udržovat v dovolených mezích. Toho lze dosáhnout právě regulací velikosti budícího proudu, tedy změnou vnitřního elektromotorického napětí stroje [24].

Budících systémů existuje několik druhů a lze je dělit na základě mnoha kritérií. Například podle způsobu napájení dělíme budící systémy na:

- nezávislé (zdroj budícího napětí je nezávislý na napětí generátoru),
- závislé (napájení je řešeno odbočkou z vývodu generátoru přes budící transformátor).

Podle typu zdroje budícího proudu lze budící systémy dělit na:

- rotační (zdrojem je rotační budič na hřídeli s rotorem generátoru),
- statické (napájeny např. přes tyristorový měnič).

3. STABILITA ELEKTRIZAČNÍCH SOUSTAV

Stabilita je v provozu přenosových soustav velmi důležitým parametrem. V elektrických sítích dochází při jejich provozu k mnoha jevům, které negativně ovlivňují stabilitu (změny topologie, proměnlivá spotřeba a výroba elektrické energie, poruchové stavy atd.). Na řízení přenosových soustav z hlediska stability, tj. udržení všech generátorů pracujících do sítě paralelně v synchronním chodu, jsou proto kladeny přísné požadavky.

3.1 Definice stability

Problematická je již samotná definice stability, mnoho odborných publikací pojmem stabilita elektrických soustav (ES) popisuje něco trochu jiného. Za účelem definování pojmu stability ES byla vytvořena pracovní skupina odborníků z IEEE a CIRGE, kteří se problematikou stability podrobně zabývali. Výsledkem jejich činnosti je publikace [10], která mimo jiné definuje stabilitu ES jako:

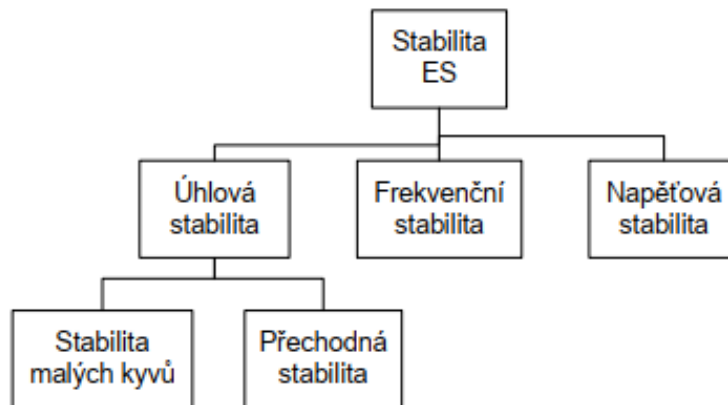
„Stabilita soustavy je schopnost, pro dané provozní podmínky, v případě rozruchu opět zaujmout rovnovážný stav, aniž by došlo k překročení dovolených mezí systémových proměnných a soustava jako celek zůstala nedotčena ([10], str. 1387).“

Pojem rozruch lze chápat jako vychýlení z rovnovážného stavu, kterým se rozumí [10]:

- provozní výchyly, tzn. změny odebíraného činného nebo jalového výkonu a změny topologie sítě (zapínání a odpínání linek vedení),
- poruchy způsobené poškozením zařízení, např. vznikem zkratů, ztráta jednoho nebo více generátorů pracujících do sítě atd.

Elektrická síť je velmi nelineární systém, jehož parametry se v čase neustále mění. Stabilita této sítě pak představuje určitou rovnováhu, danou provozními podmínkami, kterou je potřeba v daném systému udržet. Schopnost elektrické sítě zachovat svou stabilitu (rovnováhu) je závislá na mnoha faktorech, aktuálních pro konkrétní okamžik vzniku rozruchu.

Aby bylo možné stabilitu elektrizační soustavy sledovat, je užitečné jí rozdělit na několik dílčích částí. K tomu byli zavedeny 3 kategorie, uvedené na následujícím obrázku.



Obr. 3-1: Rozdělení stability ES (obr. 3.5 v [2])

Frekvenční a napěťová stabilita elektrizační soustavy je schopnost udržet stabilní frekvenci a napětí soustavy při vychýlení z rovnovážného stavu mezi výrobou a spotřebou (tj. rovnováhu dodávky a odběru činných a jalových výkonů) [2].

Úhlová stabilita se dle Obr. 3-1 ještě dělí do dvou podskupin, na stabilitu malých kyvů a přechodnou stabilitu. Pro tyto 2 podskupiny se častěji užívá označení statická stabilita (pro stabilitu malých kyvů) a dynamická stabilita (pro přechodnou stabilitu). Statickou stabilitou se rozumí schopnost udržet synchronní chod v případě malých výchylek, dynamickou stabilitou pak těch větších (např. blízký zkrat ke generátoru).

3.2 Statická stabilita

Úhlová stabilita (angl. rotor angle stability) úzce souvisí se synchronními generátory, konkrétně s rychlostí jejich rotorů. Řeší schopnosti generátorů udržet se, v případě vychýlení z rovnovážného stavu, v synchronismu s připojenou elektrizační soustavou. Udržení synchronismu je dáno schopnostmi udržet rovnováhu mezi elektrickým momentem generátoru a mechanickým momentem hnací turbíny [2].

Statická stabilita se tedy rozumí schopnosti generátoru udržet synchronismus se zbytkem soustavy v případě malých výchylek z rovnovážného stavu. Rovnovážným stavem se rozumí stabilní provoz elektrizační soustavy. V takovém stavu pracují generátory, připojené do soustavy, synchronně a soustava má konstantním daným napětím, frekvencí a výrobou činného a jalového výkonu odpovídá spotřebě.

3.2.1 Výkon přenášený přes reaktanci

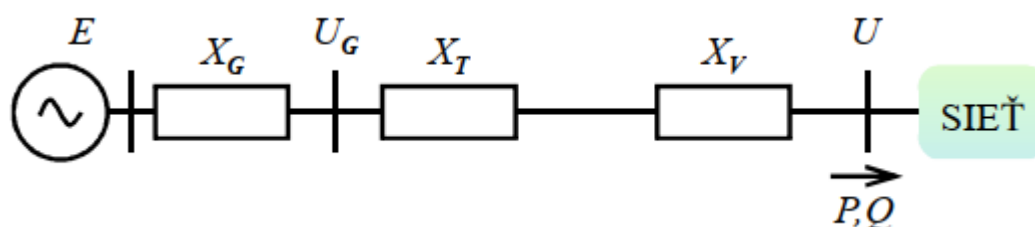
Pro posuzování statické stability se využívá závislost $P(\beta)$, kde P značí činný výkon dodávaný do sítě generátorem a β tzv. celkový zátěžný úhel, tedy úhel mezi vnitřním elektromotorickým napětím stroje a fázorem napětí v pomyslném středu soustavy (standardně se uvažuje fázor

napětí za vývodovou linkou, přes kterou je výkon generátoru přenášen do rozvodny přenosové nebo distribuční soustavy).

Vztah pro závislost činného výkonu P generátoru na zátěžném úhlu β lze odvodit z přenosu zdánlivého výkonu do soustavy, zavedeme-li následující předpoklady:

- budeme uvažovat práci pouze jednoho turbogenerátoru do soustavy
- soustava má nekonečný výkon ($X_s \rightarrow \infty$)
- napětí U_s soustavy je konstantní
- frekvence soustavy je konstantní
- zanedbáme elektrické a mechanické ztráty

Následně lze přenos zdánlivého výkonu přes transformátor a vedení, resp. jejich reaktance (rezistance zanedbáme), zavést následující náhradní schéma:



Obr. 3-2: Náhradní schéma přenosu zdánlivého výkonu přes reaktanci (obr. 2-1 v [24])

kde:

E vnitřní indukované elektromotorické napětí generátoru

U_G napětí na svorkách generátoru

U napětí soustavy

X_G podélná reaktance generátoru

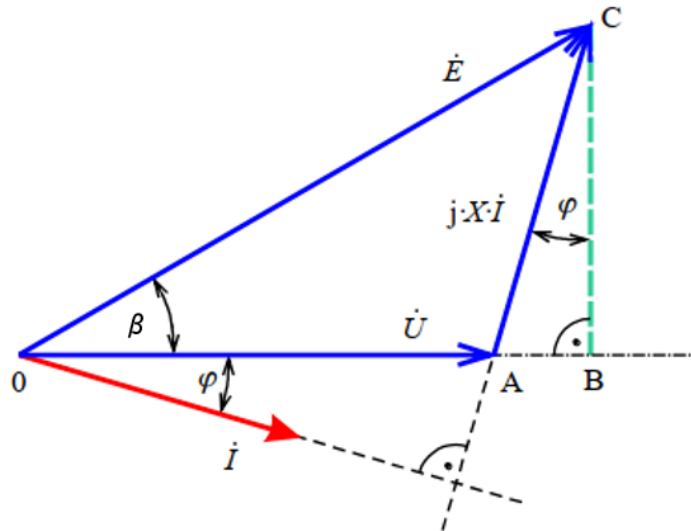
X_T reaktance transformátoru

X_V reaktance vedení

Pro zjednodušení zavedeme celkovou reaktanci X , která je dána vztahem:

$$X = X_G + X_T + X_V \quad (3-1)$$

Pro fázory napětí a proudu platí následující fázorový diagram, kde β je zátěžný úhel mezi vnitřním elektromotorickým napětím stroje E a napětím soustavy U :



Obr. 3-3: Fázorový diagram přenosu výkonu přes reaktanci (obr. 2-2 v [24])

Z diagramu je patrné, že platí následující rovnice:

$$\overline{BC} = X * I * \cos \varphi = E * \sin \beta \quad (3-2)$$

$$I * \cos \varphi = \frac{E}{X} * \sin \beta \quad (3-3)$$

$$U_{f2} * I * \cos \varphi_2 = \frac{U_{f1} * U_{f2}}{X_v} * \sin \beta_v \quad (3-4)$$

$$P = \frac{E * U}{X} * \sin \beta \quad (3-5)$$

a obdobně pro přenos jalových výkonů:

$$\overline{AB} = X * I * \sin \varphi = E * \cos \beta - U \quad (3-6)$$

$$I * \sin \varphi = \frac{E}{X} * \cos \beta - \frac{U}{X} \quad (3-7)$$

$$U * I * \sin \varphi = \frac{E * U}{X} * \cos \beta - \frac{U^2}{X} \quad (3-8)$$

$$Q = \frac{E * U}{X} * \cos \beta - \frac{U^2}{X} \quad (3-9)$$

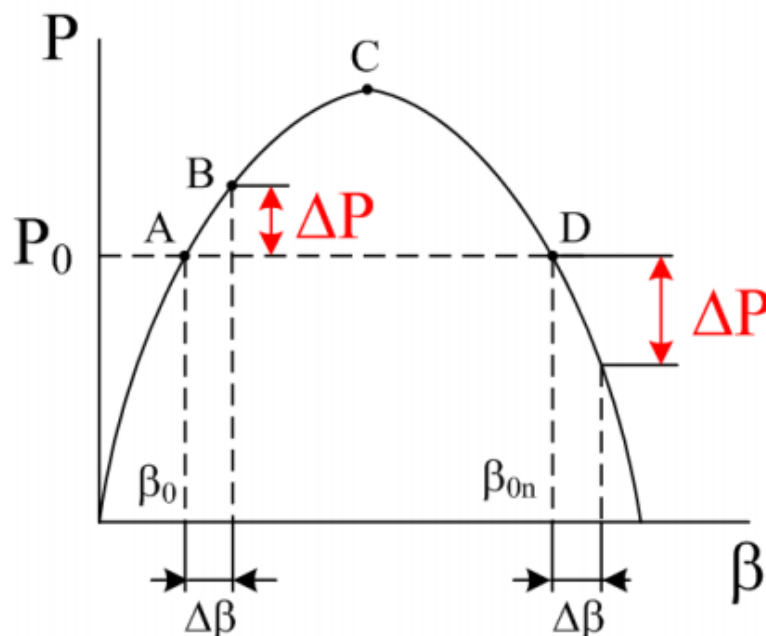
3.2.2 Výkonová charakteristika

Z rovnice (3-5) odvozené výše je zřejmé, že výkon přenášený přes reaktanci je možné zvýšit následujícími způsoby:

- zvýšením hodnot vnitřního elektromotorického napětí generátoru nebo napětí soustavy

- snížením velikosti reaktance (materiálová a konstrukční vlastnost – ovlivnitelné pouze při výrobě)
- zvýšením zátěžného úhlu (ve stabilní oblasti)

Pro vysvětlení statické stability slouží výkonová charakteristika, což je grafické vyjádření závislosti $P(\beta)$, popsané rovnicí (3-5).



Obr. 3-4: Výkonová charakteristika statické stability

Závislost $P(\beta)$, vynesena v Obr. 3-4, je důležitá pro posouzení, zda zůstane v případě rozruchu zachována statická stabilita stroje se sítí.

Do Obr. 3-4 je vyneseno několik bodů, představujících pracovní body generátoru. Bod A je dán jako průsečík křivek P a P_0 , kde křivka P představuje elektrický výkon generátoru a přímka P_0 mechanický výkon turbíny (který je na zátěžném úhlu β nezávislý). V bodě A generátor pracuje s výkonem P při mechanickém výkonu turbíny P_0 a zátěžným úhlem β_0 .

Při zvýšení mechanického výkonu turbíny na hodnotu $P_0 + \Delta P$ dojde k urychlení rotoru stroje, zvětšení zátěžného úhlu na hodnotu $\beta_0 + \Delta \beta$ a tím výkonu generátoru na hodnotu $P + \Delta P$. Generátor zaujme nový pracovní bod B .

Pokud by generátor pracoval v bodě D , došlo by v okamžiku zvýšení mechanického výkonu turbíny k urychlení rotoru stroje, zvýšení zátěžného úhlu a tím ke snížení výkonu generátoru. V takovém okamžiku není možné nalézt rovnovážný pracovní bod, stroj ztratí stabilitu, dojde k prokluzu pólů a výpadku stroje ze synchronismu.

Turbogenerátory velkých výkonů mají vždy výrobcem stanovený povolený počet prokluzu pólů. V případě překročení povoleného počtu prokluzů dojde k odstavení generátoru ochranou proti prokluzu rotoru.

Z výše uvedeného vyplývá, že generátor je schopen udržet synchronní chod pouze, pokud $\Delta P > 0$. Maximální zátěžný úhel, při kterém je generátor schopen zůstat v synchronismu, je $\beta_{\max} = 90^\circ$ (v Obr. 3-4 reprezentován pracovním bodem C). V tomto bodě dosahuje generátor maximálního výkonu P_{\max} . Výkon P_{\max} se často označuje jako mez statické stability.

Moderní regulátory budících soustav již umožňují krátkodobě pracovat i se zátěžným úhlem vyšším než 90° na mezi tzv. umělé statické stability [2].

Pro popis schopnosti stroje udržet synchronismus se také zavádí tzv. činitel synchronizačního výkonu p_s , který je dán vztahem:

$$p_s = \frac{dP}{d\beta} \quad (3-10)$$

Derivace $dP/d\beta$ pak představuje schopnost generátoru udržet synchronní chod, přičemž největší schopnost udržení je při úhlu $\beta = 0^\circ$ ($p_s > 0$) a nejmenší na mezi statické stability, v okolí úhlu $\beta = 90^\circ$ ($p_s = 0$) [9].

3.2.3 Kývání rotoru

Změny elektrického výkonu a zátěžného úhlu stroje, vyvolané urychlením rotoru, popsané v kapitole 3.2.2, nejsou skokové děje. Rovnováha v novém ustáleném pracovním bodě nenastane při změně okamžitě. To je způsobeno setrvačností rotujících částí soustrojí. Vzniká přechodný děj, při kterém se zátěžný úhel periodicky mění (tzv. tlumeně kmitá). Tento děj je však velmi krátký, brzy zaniká a zátěžný úhel se ustálí v novém rovnovážném pracovním bodě.

4. PRACOVNÍ OBLAST TURBOGENERÁTORU

Aby nedošlo k poškození, je důležité provozovat generátor v dovozených mezích. Maximální zatížení generátoru je v různých provozních stavech určováno různými omezujícími faktory (např. oteplením čelního prostoru statoru stroje způsobeným velkým magnetickým tokem, oteplením budícího vinutí, statickou stabilitou apod.) [1].

K definování těchto omezení slouží tzv. provozní diagram generátoru (nebo též PQ diagram generátoru). PQ diagram je dvojrozměrný graf, kde na horizontální ose je vynesena jalový výkon stroje Q a na vertikální ose činný výkon stroje P . Výkony se uvádí buď v pojmenovaných, nebo poměrných jednotkách.

Kromě provozních omezení daných konstrukčními vlastnostmi generátoru závisí dovolené zatížení rovněž na parametrech soustavy, ke které je generátor připojen, parametrech turbíny a požadavcích na bezpečný provoz systémů a komponent elektrárenského celku, kterého je generátor součástí (frekvence, maximální napětí v rozvodně vyvádějí výkon, minimální hodnota napětí v rozvodnách vlastní spotřeby aj.).

PQ diagram je rozdělen do dvou částí: tzv. přebuzeného a podbuzeného stavu. Pracuje-li generátor v přebuzeném stavu, dodává do sítě činnou a jalovou energii, při práci v podbuzeném stavu do sítě dodává energii činnou a odebírá energii jalovou [6]. Polohu pracovního bodu v PQ diagramu lze měnit regulátorem, který je součástí budícího systému stroje, a to změnou velikosti okamžité hodnoty budícího proudu.

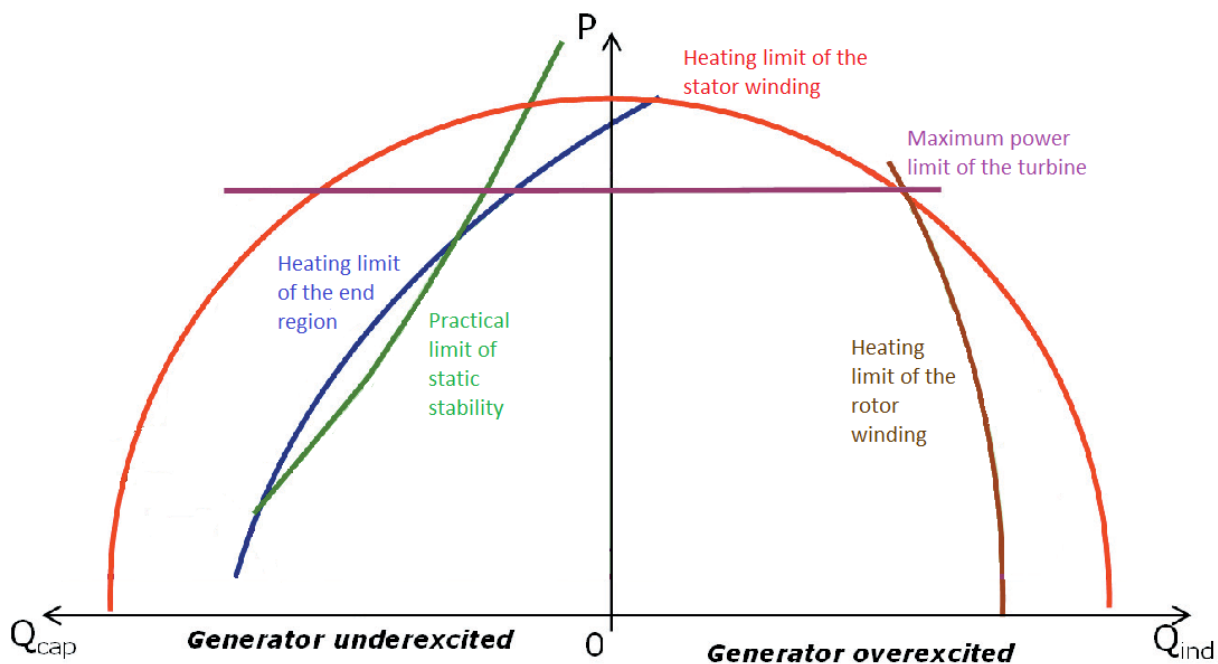
Pracovní diagram turbogenerátoru se obvykle nevynáší pro hodnoty činného výkonu $P < 0$, protože provoz stroje v takovém režimu většinou není povolen a za běžných provozních podmínek nemůže nastat, jelikož dojde k odstavení generátoru zpětnou wattovou ochranou.

4.1 Omezení daná generátorem

Omezení daná generátorem závisí na použitých materiálech, výrobních postupech, konstrukčních vlastnostech a mnoha dalších parametrech. Nejdůležitější z tohoto hlediska je maximální proudové zatížení součástí, kterými se uzavírá sdružený magnetický tok (kostra a vinutí statoru, těleso rotoru, budící vinutí). To je úměrné teplotě chladících médií. Především u turbogenerátorů velkých výkonů jsou na chladící systémy kladeny nemalé požadavky (chlazení rotoru vodíkem vyžadující komplikované vodíkové hospodářství atd.).

Na Obr. 4-1 níže je zobrazen obecný PQ diagram s omezeními danými strojem, který vznikne spojením křivek jednotlivých omezujících faktorů v přebuzeném a podbuzeném stavu. Výrobce by měl pro každý stroj stanovit PQ diagram, vymezující maximální pracovní oblast, ve které je stroj z konstrukčního hlediska schopen pracovat.

Jednotlivé omezující křivky pracovní oblasti dané strojem jsou, kromě parametrů popsaných v podkapitolách níže, závislé rovněž na svorkovém napětí generátoru.



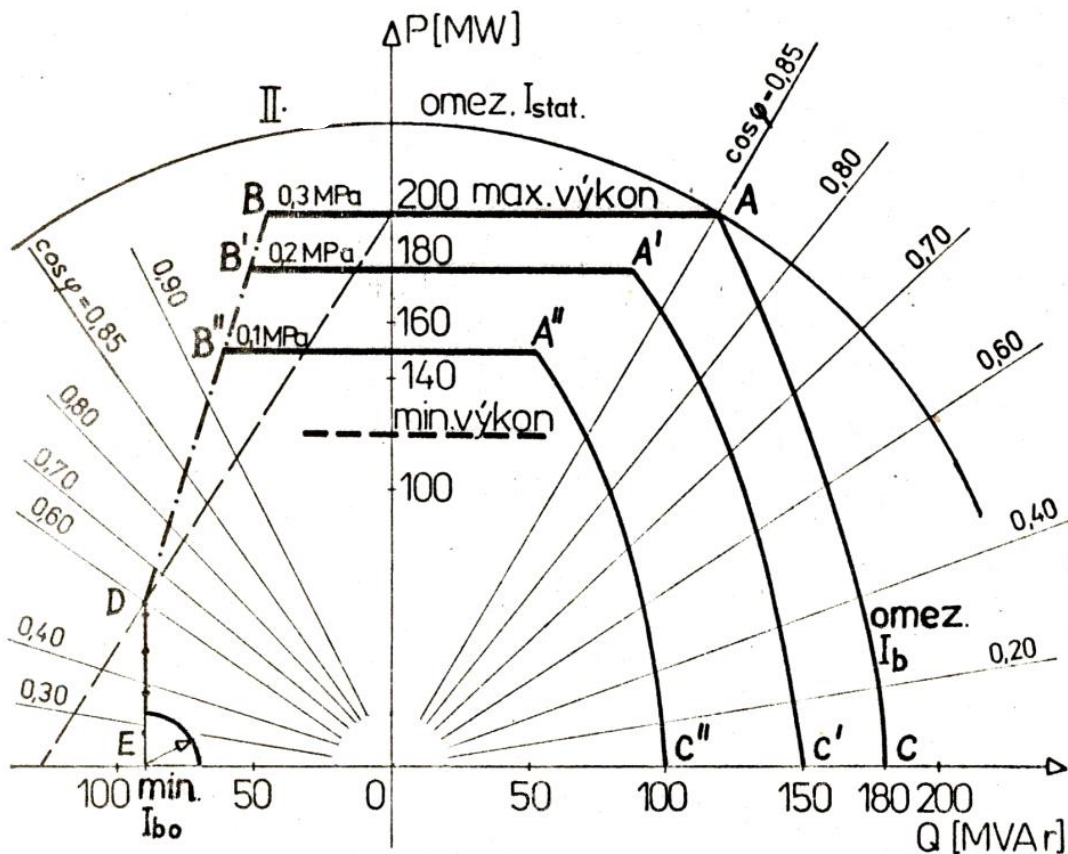
Obr. 4-1: PQ diagram omezení strojem [25]

4.1.1 Provoz generátoru v přebuzeném stavu

V přebuzeném stavu je provozní omezení dáno maximálním dovoleným budícím proudem, resp. oteplením budícího vinutí rotoru (hnědá křivka v Obr. 4-1). Oteplení budícího vinutí má, oproti statorovým částem, velmi omezené možnosti chlazení. U velkých turbogenerátorů se pro chlazení rotorových částí užívá vodík a velký vliv představuje tlak vodíku ve stroji. Pro schopnost stroje dodávat jalovou energii do sítě je limitujícím faktorem velikost budícího proudu, který je závislý na aktuálních chladících schopnostech generátoru [6].

Z Obr. 4-2 níže je patrná závislost omezení oteplením budícího vinutí rotoru na tlaku vodíku ve stroji (0,1 až 0,3 MPa – křivky AC, A'C' a A''C''), pro generátor se zdánlivým výkonem 280 MVA a jmenovitý účinník 0,85.

V obrázku Obr. 4-1 je dále vynesena kružnice představující v přebuzeném stavu omezení oteplením daným statorovým proudem. Díky jednodušším možnostem chlazení statorových (nepohyblivých) částí stroje se omezení statorovým proudem pro uvažovaný rozsah výkonů oproti ostatním omezením většinou neprojeví [6].



Obr. 4-2: Závislosti omezení budícím proudem na tlaku vodíku ve stojí (obr. 2.36 v [6])

4.1.2 Provoz generátoru v podbuzeném stavu

Při provozu generátoru v podbuzeném stavu je omezení pracovní oblasti dáno oteplením satorového vinutí a především oteplením čelního prostoru satoru stroje způsobeným velkým magnetickým tokem (modrá křivka v Obr. 4-1). Při provozu generátoru v podbuzeném stavu dochází k vzájemnému posunu rozptylových toků satoru a rotoru. To má za následek uzavírání rozptylového toku reakce kotvy obručemi rotoru v místech mezi rotorovými póly. Tato místa mají menší magnetický odpor, dojde tedy ke zvýšení rozptylového magnetického toku satoru, zvýšení ztrát a následnému oteplení čel satoru [1].

Další omezení v podbuzené oblasti představuje statická stabilita, popsána v kapitole 4.3 níže. V oblastech nízkých činným výkonů ještě dochází k omezení minimálním budícím proudem, to však není v Obr. 4-1 naznačeno.

4.2 Omezení turbínou

Další omezení provozní oblasti představuje maximální mechanický výkon, který je možné přenášet přes rotorové soustrojí (fialová vodorovná křivka na Obr. 4-1). Ten je dán vlastnostmi turbíny, způsobem jejího pohánění, aktuálním průtokem hnacího média přes lopatky turbíny,

třecími ztrátami v ložiskách hřídele a mnoha dalšími faktory. Pro pohon velkých turbogenerátorů se nejčastěji používají turbíny parní, kde se jako nosné médium využívá přehřátá vodní pára. Parní turbíny se zpravidla skládají z vysokotlakých, středotlakých a nízkotlakých dílů, což zvětšuje množství energie předané lopatkám turbíny nosným médiem a zvyšuje účinnost tepelného cyklu. Parní turbíny se konstruují a provozují tak, aby jejich otáčivá rychlost, regulovaná průtokem média, odpovídala otáčkám turbogenerátoru podle rovnice (2-1).

4.3 Omezení statickou stabilitou

Další omezení představuje křivka statické stability generátoru a napájené soustavy (zelená křivka na Obr. 4-1). Překročí-li pracovní bod tuto křivku, dojde k výpadku stroje ze synchronismu. Maximální zátěžný úhel mezi vnitřním napětím generátoru a pomyslným středem soustavy je v tomto případě $\beta = 90^\circ$ (dnešní moderní regulátory již umožňují krátkodobě pracovat i se zátěžným úhlem nepatrně vyšším).

Omezení statickou stabilitou představuje jedno z nejpřísnějších omezení pro práci stroje v podbuzené oblasti. Určení meze statické stability je matematicky velmi složité, jelikož statickou stabilitu ovlivňuje mnoho faktorů. Schopnost generátoru udržet v daném pracovním bodě stabilitu s připojenou soustavou silně závisí, mimo jiné, např. na hodnotě napětí, frekvence a aktuální topologii rozvodny vyvedení výkonu a celé přenosové soustavy.

Pro stanovení meze statické stability existuje několik metod a způsobů výpočtu. V dnešní době se pro stanovení hranice statické stability nejčastěji používají tzv. síťové simulátory, tedy programy umožňující modelovat rozlehlé elektrické soustavy a simulovat jejich chování pro různé provozní stavy.

Výsledky výpočtů statické stability pak slouží pro nastavení hlídače meze podbuzení. Ten je implementován v budícím systému generátoru a zabraňuje přílišnému odbuzení generátoru a případné ztrátě stability.

Moderní hlídače meze podbuzení umožňují dynamicky měnit své nastavení v závislosti na parametrech, ovlivňujících statickou stabilitu.

V případě ztráty statické stability jsou velké turbogenerátory vybaveny ochranou proti prokluzu pólů rotoru, která v případě výpadku ze synchronismu po povoleném počtu prokluzů, stanoveném výrobcem, odstaví stroj z provozu.

4.4 Omezení maximálním napětím přenosové cesty a soustavy

Při provozu generátoru v režimu vyvádění elektrického výkonu do připojené přenosové soustavy je třeba dodržet podmínky stanovené normou ČSN EN 60038 pro nejvyšší napětí pro zařízení trojfázové střídavé soustavy [11].

V přenosové soustavě České republiky, která je součástí evropského společenství ENTSO-E, se pro přenos elektrické energie využívají napěťové hladiny 400 kV a 220 kV. Turbogenerátory velkých výkonů se standardně připojují přes blokové transformátory k napěťové hladině 400 kV, pro

kteřou stanovuje norma [11] nejvyšší přípustnou hodnotu napětí 420 kV. Generátor musí být tedy provozován tak, aby napětí žádném místě přenosové cesty vyvedení výkonu nepřesáhlo tuto hodnotu, což představuje další potenciální omezení oblasti provozního diagramu.

4.5 Omezení minimálním napětím vlastní spotřeby

Problematikou vlastní spotřeby se zabývá česká norma ČSN 38 1120 [13]. Ta je určena především pro tepelné elektrárny a teplárny, nicméně se aplikuje i v elektrárnách jaderných a dalších. Tato norma požaduje, pro napětí v ustáleném stavu, udržovat napětí na svorkách spotřebičů v mezi - 5 % až + 5 % jmenovité hodnoty. Zahrneme-li do tohoto požadavku ještě úbytky na napájecích kabelech uvažovaných spotřebičů, dostáváme poměrně přísný požadavek, především v oblasti sníženého napětí.

Vlastní spotřeba by vždy měla být realizována tak, aby v co největší možné míře zajišťovala bezporuchovost a spolehlivost dodávek elektrické energie. Tento požadavek je důležitý především v elektrárnách, využívajících jako zdroj tepla jadernou energii. V případě jaderných elektráren může výpadek napájení způsobit, kromě případného poškození technologie, v krajním případě až únik radioaktivních látek do atmosféry.

U elektrárenských bloků, vybavených velkými turbogenerátory, se rozvod vlastní spotřeby zpravidla napájí odbočkou generátoru přes transformátor vlastní spotřeby, nazývaný odbočkový transformátor. Ten zajišťuje snížení hladiny napětí, nejčastěji na 6, příp. na 10 kV. V České republice je odbočkový transformátor standardně vybaven automatickým přepínačem odboček na primární straně, umožňující změnu napětíového poměru transformátoru a regulaci napětí v závislosti na provozním stavu generátoru a vlastní spotřeby.

Nicméně může nastat situace, kdy napětí v rozvodnách vlastní spotřeby klesne mimo regulační schopnost přepínače odboček a dalším odbuzením generátoru by mohlo dojít k poklesu napětí vlastní spotřeby pod mez dovolenou normou [13]. Tím vzniká případné další omezení pracovního diagramu generátoru v podbuzené oblasti. Nutno však uvést, že toto omezení se výrazněji projeví až při sníženém napětí v soustavě, za běžných provozních podmínek je toto omezení daleko za omezením např. statickou stabilitou.

5. VÝPOČTOVÝ MODEL

Provedení výpočtů statické stability v následujících částech této práce vychází z modelu, vytvořeného ze vstupních dat, poskytnutých společností ČEZ pro jadernou elektrárnu Temelín. Ta se nachází v jižních Čechách, v blízkosti města Týn nad Vltavou, a disponuje dvěma výrobními bloky. V elektrárně jsou instalovány jaderné reaktory ruského typu VVER-1000 o výkonu 2×3 120 MWt a jejich maximální elektrický výkon dodávaný do sítě činí 2×1250 MVA (2×1125 MWe).

První blok elektrárny byl uveden do provozu ve druhé polovině roku 2000, druhý pak o necelé 2 roky později. Elektrárna celkem ročně vyrobí (po poslední modernizaci a zvyšování výkonu) přibližně 15,75 TWh elektrické energie a pokrývá tak cca 20 % celkové roční výroby v ČR [14].

Mezi technologická zařízení, vstupující do výpočtů statické stability, patří generátory, blokové a odbočkové transformátory, linky vyvedení výkonu a přenosová soustava, do které je vyrobený elektrický výkon vyváděn. Parametry, převzaté z materiálů poskytnutých společností ČEZ ETE, generátoru ETE 1 a dalších zařízení uvažovaných v modelu, jsou uvedeny v následujících podkapitolách.

5.1 Generátor

Generátor zajišťuje fyzikální přeměnu mechanické energie turbíny na elektrickou energii. Je to uzavřený, dvoupólový, třífázový synchronní generátor s kombinovaným chlazením. Vinutí statoru, průchodky a nulová spojka jsou chlazeny demivodou, ostatní aktivní části stroje vodíkem a sběrací zařízení vzduchem [17].

Tab. 5-1: Jmenovité parametry generátoru [5]

Parametr	Hodnota	Jednotka
Jmenovitý zdánlivý výkon	1 250	MVA
Jmenovitý činný výkon	1 125	MW
Jmenovitý účinník	0,9 ind.	-
Jmenovitá frekvence	50	Hz
Jmenovité sdružené napětí statoru	24 ± 5 %	kV
Jmenovitý proud statoru	30,07	kA
Jmenovité otáčky	3000	ot./min
Rázová podélná sycená reaktance	31,4	%
Přechodná podélná sycená reaktance	38,5	%
Synchronní podélná sycená reaktance	277	%

5.1.1 Budící systém

Budící systém napájí rotor turbogenerátoru plynule regulovaným budícím proudem a umožňuje regulaci napětí a jalového výkonu generátoru [17]. Na generátorech elektrárny Temelín jsou instalovány systémy buzení, tvořeny:

- budícím generátorem,
- statická budící soupravou.

5.1.1.1 Budící generátor

Budící generátor je uzavřený dvoupólový, třífázový synchronní generátor se vzduchovým chlazením. Stator je tvořen dynamoplechy, rotor je jednoduchý výkovek, přes spojku pevně spojen s rotorem sběracího ústrojí turbogenerátoru. Budící generátor má následující parametry [17]:

Tab. 5-2: Jmenovité parametry budícího generátoru [17]

Parametr	Hodnota	Jednotka
Jmenovitý zdánlivý výkon	7 700	kVA
Jmenovitý činný výkon	4 370	kW
Jmenovitý účinník	0,57	-
Jmenovitá frekvence	50	Hz
Jmenovité sdružené napětí statoru	690	V
Jmenovitý proud statoru	6 440	A
Jmenovité otáčky	3000	ot./min

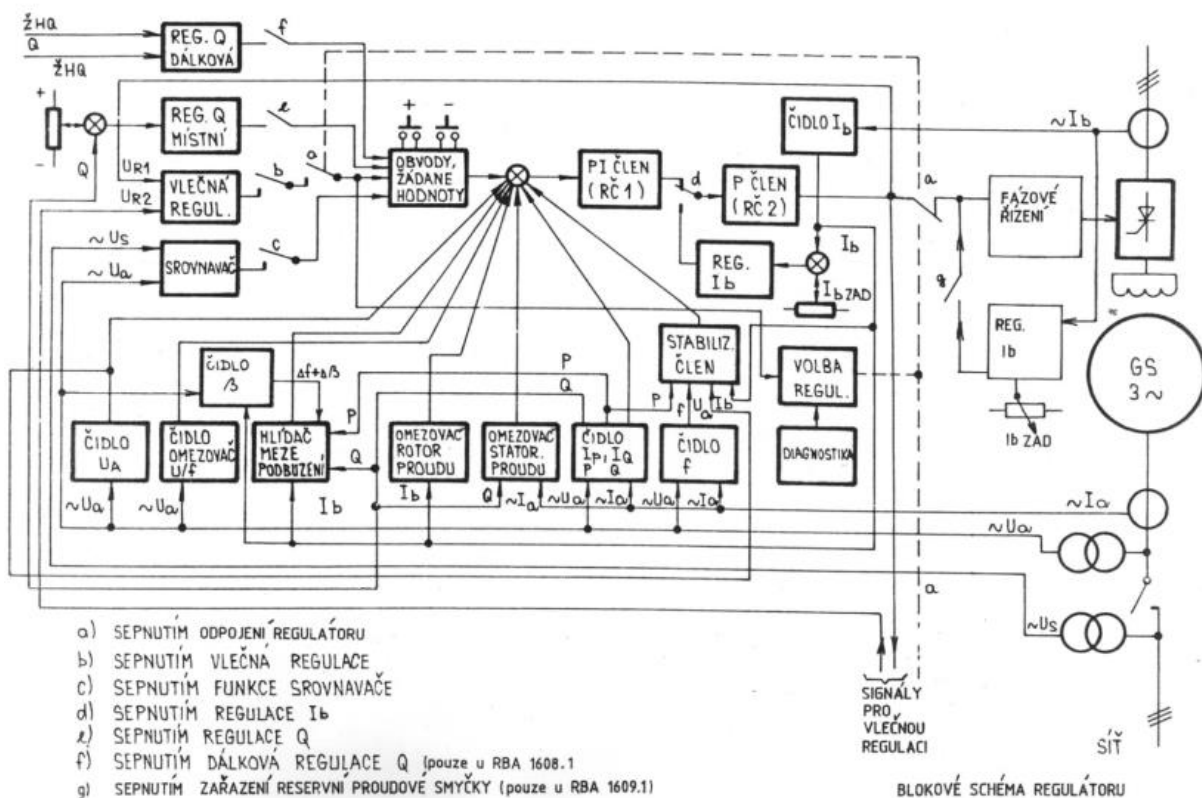
5.1.1.2 Statická budící souprava

Statická budící souprava je tvořena výkonovou částí, řídicí a regulační částí a částí buzení budícího generátoru. Výkonová část obsahuje výkonové měniče (4× třífázový tyristorový můstek) a propojení výstupu měničů se sběracím zařízením rotoru generátoru. Část buzení budícího generátoru zajišťuje počáteční nabuzení a udržuje konstantní napětí statoru budícího generátoru. Řídicí a regulační část obsahuje regulátor buzení PRIMIS 186 [17].

Regulátor slouží k regulaci buzení generátoru. Umožňuje regulaci napětí, jalového výkonu a budícího proudu. Obsahuje následující omezovače [17]:

- omezovač proudu rotoru,
- omezovač proudu statoru,
- hlídač meze podbuzení,
- omezovač U/f

Dále je vybaven automatickým srovnávačem napětí generátoru a sítě, čidlem zátěžného úhlu, vlečnou a dálkovou regulací atd. Blokové schéma regulátoru je na Obr. 5-1.



Obr. 5-1: Blokové schéma regulátoru buzení (obr. 1 v [17])

5.2 Blokový transformátor

Blokový transformátor transformuje napětí 24 kV ze svorek generátoru na napětí 400 kV elektrizační soustavy. Při odstaveném generátoru transformuje napětí sítě 400 kV na napětí 24 kV pro napájení vlastní spotřeby přes odbočkové transformátory. Blokový transformátor je tvořen třemi jednofázovými jednotkami, chlazení je v provedení typu OFAF [18].

Tab. 5-3: Parametry blokového transformátoru [18]

Parametr	Hodnota	Jednotka
Jmenovitý výkon	3×400	MVA
Jmenovité napětí	420/√3/24	kV
Jmenovitý proud	1,65/16,66	kA
Jmenovitá frekvence	50	Hz
Napětí nakrátko	14	%
Ztráty nakrátko	750	kW
Ztráty naprázdno	240	kW
Spojení vinutí	YNd1	-

5.3 Odbočkový transformátor

Odbočkový transformátor je třífázový, trojvinuťový, s regulací napětí na straně vyššího napětí [18]. V ETE přísluší každému bloku 2 odbočkové transformátory, v modelu je však pro zjednodušení uvažován pouze jeden.

Tab. 5-4: Parametry odbočkového transformátoru [18]

Parametr	Hodnota	Jednotka
Jmenovitý výkon	63/31,5/31,5	MVA
Jmenovité napětí	24 ± 4×4 %/6,3/6,3	kV
Jmenovitý proud	1,52/2,89/2,89	kA
Jmenovitá frekvence	50	Hz
Napětí nakrátko	9/9/18	%
Ztráty nakrátko	230	kW
Ztráty naprázdno	47	kW
Proud naprázdno	0,5	-
Spojení vinutí	Dd0d0	-

5.4 Vlastní spotřeba

Pro potřeby této práce je uvažováno napájení vlastní spotřeby jedním odbočkovým transformátorem. Odběr vlastní spotřeby je uvažován konstantní a rovnoměrně rozložený na sekundárních vinutích odbočkového transformátoru. Velikost odběru byla stanovena na základě dat z diagnostického systému NEMES, následovně:

Tab. 5-5: Parametry vlastní spotřeby

Parametr	Hodnota	Jednotka
Odběr činného výkonu vlastní spotřebou	45	MW
Odběr jalového výkonu vlastní spotřebou	-30	MVAr

5.5 Vedení

Vývodové vedení 400 kV propojuje blokový transformátor s rozvodnou vyvedení výkonu (v případě ETE rozvodna R400 kV Kočín). Vedení je tvořeno svazkovým vodičem vytvořeným z lana 2×750 AlFe/43 [19].

Tab. 5-6: Parametry vedení [19]

Parametr	Hodnota	Jednotka
Reaktance vedení (sousedná)	0,279	Ω/km
Reaktance vedení (netočivá)	1,91	Ω/km

Parametr	Hodnota	Jednotka
Délka vedení	2,937	km

5.6 Soustava

V rámci modelu je uvažováno zahrnutí soustavy pro potřeby analýzy jejího vlivu na statickou stabilitu. Soustava je charakterizována vnější reaktancí x_{sous} , která byla vypočtena v ČEPS a následně předána ETE. Reaktance byla stanovena pro 4 případy dle aktuální topologie R 400 kV Kočín:

1. všechna vedení jsou v provozu a kompenzační tlumivka je vypnuta

$$x_{sous1} = 0,1139 -$$

2. všechna vedení jsou v provozu a kompenzační tlumivka je zapnutá

$$x_{sous2} = 0,1119 -$$

3. linka V475 (Kočín – Řeporyje) a tlumivka jsou vypnuté

$$x_{sous3} = 0,1328 -$$

4. linka V475 (Kočín – Řeporyje), linka V433 (Kočín – Dasný - Slavětice) a tlumivka jsou vypnuté

$$x_{sous4} = 0,1367 -$$

Pozn.: vnější reaktance jsou vztaženy ke jmenovitému zdánlivému výkonu generátoru $S_n = 1250$ MVA.

Ve výpočtech fázorového diagramu a PQ diagramů, provedených v [Příloha 1], je uvažována vnější reaktance x_{sous} pro případy č. 1 a č. 4, reprezentující nejčastější způsob provozu a nejpřísnější omezení z hlediska statické stability.

5.7 Fázorový diagram

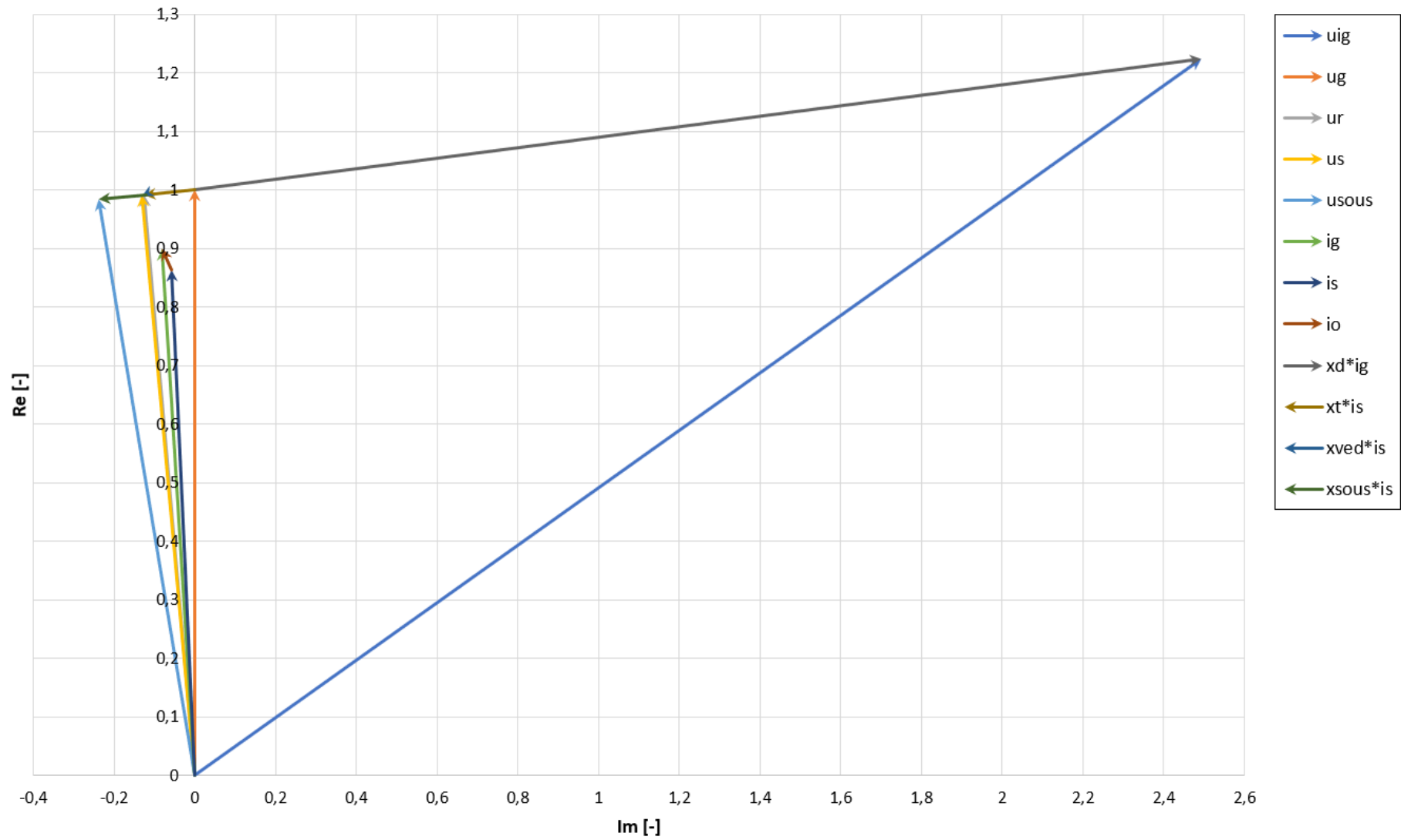
Parametry modelu pro výpočet statické stability, uvedené v kapitolách 5.1 až 5.6, jsou přepočteny na následující vztažné hodnoty:

- vztažný výkon $S_v = 1250$ MVA,
- vztažné napětí $U_v = 24$ kV.

Označení jednotlivých fázorů napětí, proudů a úbytků na reaktancích vychází z náhradního schématu, uvedeného v kapitole 6.2.

Podrobný výpočet fázorů je uveden v [Příloha 1].

FÁZOROVÝ DIAGRAM GENERÁTORU ETE 1



Obr. 5-2: Fázorový diagram generátoru

6. VÝPOČET STATICKÉ STABILITY FÁZOROVOU METODOU

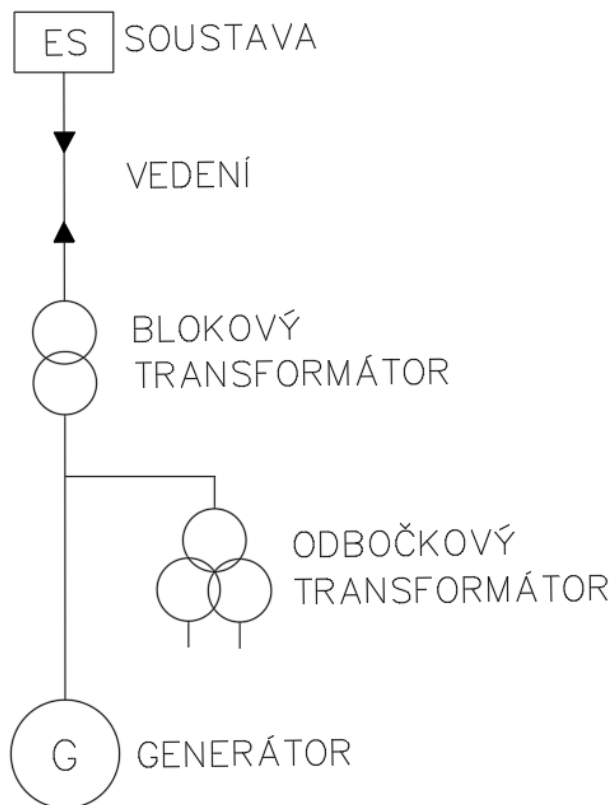
Výpočet statické stability fázorovou metodou vychází, jak již jeho název napovídá, ze statického fázorového diagramu generátoru. Odvozením příslušných vztahů z fázorového diagramu vznikne rovnice, popisující křivku omezení statickou stabilitou v podbuzené oblasti.

Odvození v kap. 6.4 vychází z odvození provedeného doc. J. Zimou v [1], ale je rozšířeno o odběr výkonu vlastní spotřebou elektrárny a v celkové vnější reaktanci, použité ve výpočtu, uvažuje kromě reaktancí blokového transformátoru a linky vyvedení výkonu ještě reaktanci soustavy x_{sous} .

V kapitolách 6.5, 6.6 a 6.7 jsou provedeny odvození dalších vztahů potřebných pro vynesení všech omezení pracovní oblasti, popsaných v kapitole 4. Vynesením všech odvozených křivek do PQ roviny vzniknou diagramy, vynesené a popsané v kapitole 6.8.

6.1 Předpoklady

Pro odvození výpočtu statické stability předpokládáme standardní vyvedení výkonu z generátoru přes blokový transformátor a VN linku do elektrické soustavy, včetně odběru el. energie pro napájení vlastní spotřeby, dle schématu na Obr. 6-1.



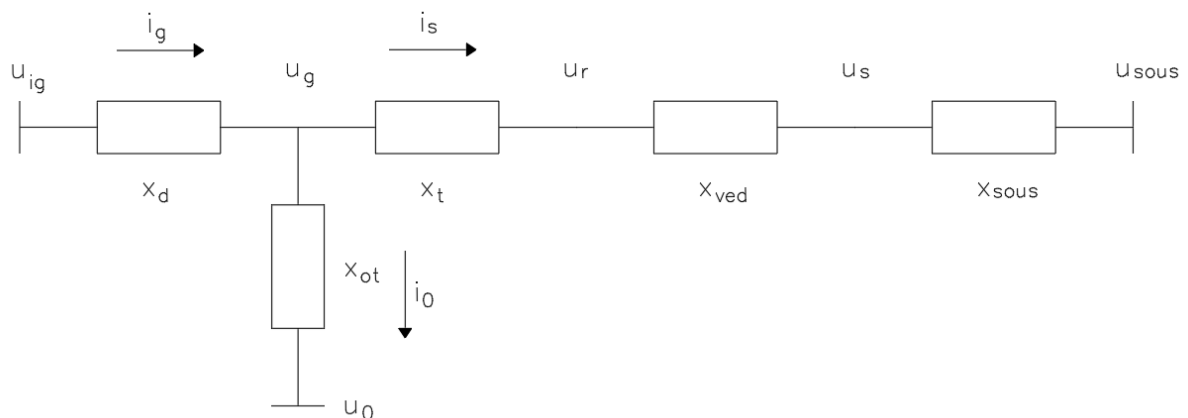
Obr. 6-1: Schéma vyvedení výkonu

Pro odvození jsou dále zavedeny následující předpoklady:

- v náhradních schématech transformátorů a vedení jsou zanedbány příčné složky impedancí,
- jsou zanedbány rezistance všech uvažovaných prvků,
- všechny uvažované reaktance jsou lineárně závislé na frekvenci,
- pro generátor s hladkým rotorem je zavedeno zjednodušení $X_d = X_q$,
- příkon vlastní spotřeby je konstantní,
- příkon vlastní spotřeby je na sekundárních vinutích odbočkového transformátoru rozdělen rovnoměrně,
- je zavedena generátorová znaménková konvence, záporný jalový výkon značí odběr ze sítě (práci v podbuzeném stavu), kladný jalový výkon představuje dodávku do sítě (přebuzený stav).

6.2 Náhradní schéma

Na Obr. 6-2 je vyneseno náhradní schéma v poměrných jednotkách pro zapojení dle Obr. 6-1.



Obr. 6-2: Náhradní schéma vyvedení výkonu

V náhradním schématu na Obr. 6-2 jsou vyneseny následující parametry:

- U_{ig} vnitřní elektromotorické napětí generátoru
- U_g napětí na svorkách generátoru
- U_0 napětí v rozvodnách vlastní spotřeby
- U_r napětí za blokovým transformátorem
- U_s napětí v rozvodně vyvedení výkonu
- U_{sous} napětí v pomyslném středu soustavy
- X_d synchronní podélná reaktance generátoru

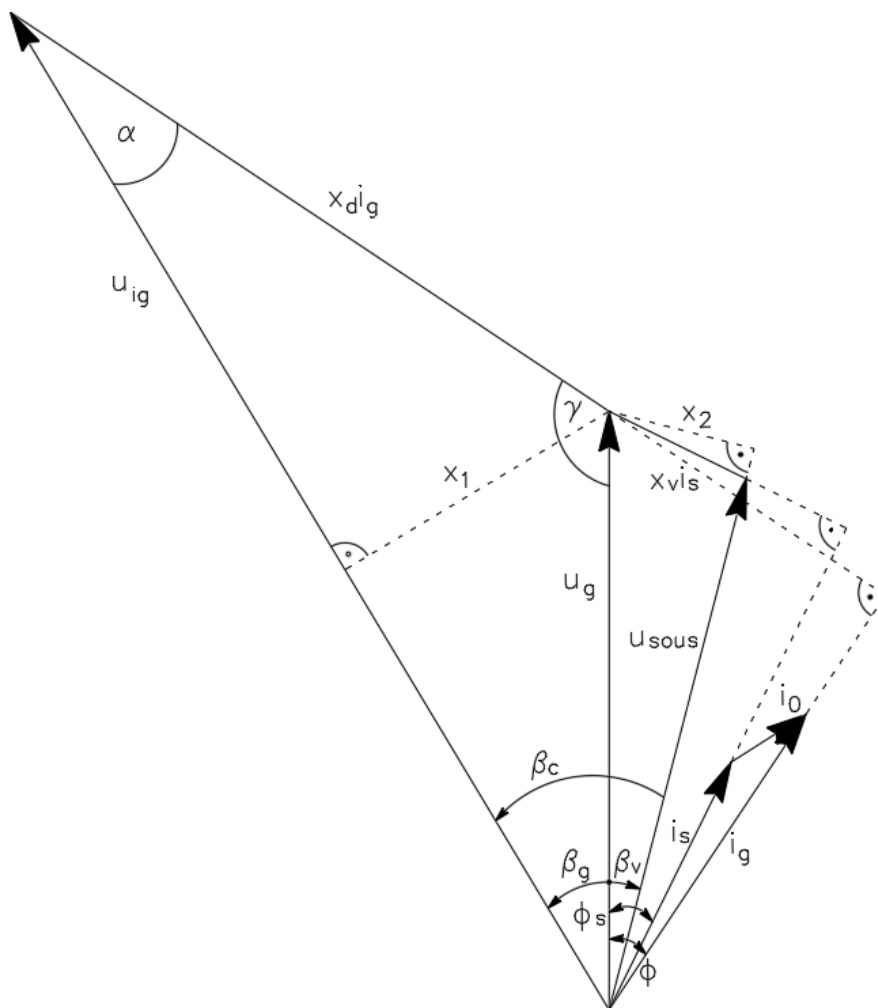
x_t reaktance blokového transformátoru

x_{ved} reaktance přenosové linky (vedení)

x_{sous} reaktance elektrické soustavy (reaktance mezi rozvodnou vyvedení výkonu z generátoru a pomyslným středem soustavy)

6.3 Fázorový diagram

Z náhradního schématu vychází fázorový diagram na Obr. 6-3, ve kterém jsou zobrazeny fázory napětí a proudů generátoru a připojené soustavy, včetně příslušných úhlů mezi nimi.



Obr. 6-3: Fázorový diagram pro odvození statické stability

V Obr. 6-3 jsou navíc, oproti Obr. 6-2, zobrazeny následující parametry:

i_g proud generátoru

i_s proud tekoucí z generátoru do soustavy

i_0 proud vlastní spotřeby

β_c celkový zátěžný úhel

β_gzátěžný úhel generátoru

β_vvnější zátěžný úhel

φúčinník generátoru

x_vcelková vnější reaktance

Vnější reaktance x_v v diagramu Obr. 6-3 zahrnuje reaktanci blokového transformátoru x_t , reaktanci vedení x_{ved} a reaktanci soustavy x_{sous} . Platí:

$$x_v = x_t + x_{ved} + x_{sous} \quad (6-1)$$

6.4 Odvození vzorce statické stability

6.4.1 Dopočet úhlů

Pro potřeby odvození je nutné nejprve dopočítat velikosti zbylých úhlů, v Obr. 6-3 označených řeckými písmeny α a γ .

Úhel α lze stanovit z pravoúhlého trojúhelníku daného vektory u_{ig} a i_g (součet vnitřních úhlů trojúhelníku je vždy 180°) následovně:

$$\alpha = \pi - \frac{\pi}{2} - (\varphi + \beta_g) = \frac{\pi}{2} - (\varphi + \beta_c - \beta_v) \quad (6-2)$$

a obdobně pro úhel γ , který tvoří dopočet do 180° k pravoúhlému trojúhelníku tvořeného vektory u_s a i_g .

$$\gamma = \pi - \left(\pi - \frac{\pi}{2} - (\varphi_s - \beta_v) \right) = \frac{\pi}{2} + (\varphi_s - \beta_v) \quad (6-3)$$

6.4.2 Vztahy pro zátěžné úhly

Z úhlů dopočítaných v kapitole 6.4.1 lze následně stanovit následující vztahy pro zátěžné úhly. Proměnná x_1 reprezentuje výšku trojúhelníku u_g , $x_d i_g$ a u_{ig} (v Obr. 6-3 vyznačeno čárkovaně).

$$\sin \beta_g = \frac{x_1}{u_g} \Rightarrow x_1 = u_g * \sin \beta_g \quad (6-4)$$

$$\sin \alpha = \frac{x_1}{x_d i_g} \quad (6-5)$$

Dosazením rovnice (6-4) do (6-5) dostáváme:

$$\sin \alpha = \frac{u_g * \sin \beta_g}{x_d i_g} \Rightarrow \frac{u_g}{x_d i_g} = \frac{\sin[\frac{\pi}{2} - (\varphi + \beta_c - \beta_v)]}{\sin \beta_g} = \frac{\cos(\varphi + \beta_c - \beta_v)}{\sin(\beta_c - \beta_v)} \quad (6-6)$$

Obdobný vztah lze získat i pro úhly β_v a γ :

$$\sin \beta_v = \frac{x_2}{u_g} \Rightarrow x_2 = u_g * \sin \beta_v \quad (6-7)$$

$$\sin \gamma = \frac{x_2}{x_v i_s} \quad (6-8)$$

a opět dosazením (6-7) do (6-8) získáme:

$$\sin \gamma = \frac{u_g * \sin \beta_v}{x_v i_s} \Rightarrow \frac{u_g}{x_v i_s} = \frac{\sin(\frac{\pi}{2} + \varphi_s - \beta_v)}{\sin \beta_v} = \frac{\cos(\varphi_s - \beta_v)}{\sin \beta_v} \quad (6-9)$$

6.4.3 Výpočet $\text{tg}(\beta_v)$

Pro odvození vztahu $\text{tg}(\beta_v)$ aplikujeme součtové vzorce na rovnici (6-9), a dostaneme:

$$\frac{u_g}{x_v i_s} = \frac{\cos \varphi_s \sin \beta_v + \sin \varphi_s \cos \beta_v}{\sin \beta_v} = \frac{\cos \beta_v}{\sin \beta_v} \cos \varphi_s + \sin \varphi_s \quad (6-10)$$

Po vydělení rovnice (6-10) členem $\cos(\varphi_s)$ a úpravě:

$$\frac{u_g}{x_v i_s \cos \varphi_s} = \frac{\cos \beta_v}{\sin \beta_v} + \frac{\sin \varphi_s}{\cos \varphi_s} \quad (6-11)$$

$$\frac{\cos \beta_v}{\sin \beta_v} = \frac{U_g - x_v i_s \sin \varphi_s}{x_v i_s \cos \varphi_s} \quad (6-12)$$

Rozšířením pravého členu rovnice (6-12) a umocněním na -1 vznikne:

$$\frac{\sin \beta_v}{\cos \beta_v} = \frac{x_v i_s \cos \varphi_s}{U_g - x_v i_s \sin \varphi_s} * \frac{U_g}{U_g} \quad (6-13)$$

$$\tan \beta_v = \frac{U_g i_s \cos \varphi_s * x_v}{U_g^2 - U_g i_s \sin \varphi_s * x_v} \quad (6-14)$$

Pro výkon dodávaný do soustavy platí následující vztahy:

$$p_s = U_g i_s \cos \varphi_s \quad q_s = U_g i_s \sin \varphi_s \quad (6-15)$$

Dosazením vztahů z rovnic (6-15) do rovnice (6-14) získáme vztah pro $\text{tg}(\beta_v)$:

$$\tan \beta_v = \frac{p_s * x_v}{u_g^2 - q_s * x_v} \quad (6-16)$$

6.4.4 Odvození závislosti $q_g = f(p_g)$

Z rovnic a vztahů odvozených v předešlých kapitolách lze již vyjádřit závislost jalového na činném výkonu generátoru $q_g = f(p_g)$.

Aplikací součtových vzorců na rovnici (6-6) dostaneme:

$$\frac{u_g}{x_d i_g} = \frac{\cos \varphi * (\cos \beta_c \cos \beta_v + \sin \beta_c \sin \beta_v) - \sin \varphi * (\sin \beta_c \cos \beta_v - \cos \beta_c \sin \beta_v)}{\sin \beta_c \cos \beta_v - \cos \beta_c \sin \beta_v} \quad (6-17)$$

Roznásobením závorek a rozšířením čitatele a jmenovatele pravé strany rovnice (6-17) členem $1/\cos \beta_v$ získáme:

$$\frac{u_g}{x_d i_g} = \frac{\cos \varphi \cos \beta_c + \cos \varphi \sin \beta_c \tan \beta_v - \sin \varphi \sin \beta_c + \sin \varphi \cos \beta_c \tan \beta_v}{\sin \beta_c - \cos \beta_c \tan \beta_v} \quad (6-18)$$

a po rozšíření čitatele i jmenovatele pravé strany rovnice (6-18) členem $1/\cos \beta_c$:

$$\frac{u_g}{x_d i_g} = \frac{\cos \varphi + \cos \varphi \tan \beta_c \tan \beta_v - \sin \varphi \tan \beta_c + \sin \varphi \tan \beta_v}{\tan \beta_c - \tan \beta_v} \quad (6-19)$$

Nyní odstraníme zlomek a obě strany rovnice (6-19) vynásobíme u_g :

$$u_g^2 * (\tan \beta_c - \tan \beta_v) = x_d i_g u_g * (\cos \varphi + \cos \varphi \tan \beta_c \tan \beta_v - \sin \varphi \tan \beta_c + \sin \varphi \tan \beta_v) \quad (6-20)$$

Nyní lze aplikovat vztahy pro výkon na svorkách generátoru:

$$p_g = U_g i_g \cos \varphi \quad q_g = U_g i_g \sin \varphi \quad (6-21)$$

Dosazením vztahů (6-21) do rovnice (6-20) dostaneme:

$$u_g^2 * (\tan \beta_c - \tan \beta_v) = x_d * (p_g + p_g \tan \beta_c \tan \beta_v - q_g * \tan \beta_c + q_g * \tan \beta_v) \quad (6-22)$$

Do rovnice (6-22) nyní dosadíme rovnici (6-16), odvozenou v kapitole 6.4.3, přičemž dle Obr. 6-3 platí pro vztah mezi výkonem na svorkách generátoru a výkonem dodávaným do soustavy:

$$p_s = p_g - p_0 \quad q_s = q_g - q_0 \quad (6-23)$$

$$\begin{aligned} & u_g^2 \left[\tan \beta_c - \frac{(p_g - p_0)x_v}{U_g^2 - (q_g - q_0)x_v} \right] \\ &= x_d \left[(p_g + p_g \tan \beta_c \frac{(p_g - p_0)x_v}{U_g^2 - (q_g - q_0)x_v} - q_g \tan \beta_c + q_g \frac{(p_g - p_0)x_v}{U_g^2 - (q_g - q_0)x_v} \right] \end{aligned} \quad (6-24)$$

následným vynásobením rovnice (6-24) členem ve jmenovateli získáme:

$$= x_d [(p_g(U_g^2 - (q_g - q_0)x_v) + p_g \tan \beta_c (p_g - p_0)x_v - q_g \tan \beta_c (U_g^2 - (q_g - q_0)x_v) + q_g(p_g - p_0)x_v)] \quad (6-25)$$

Vyjádřením q_g z rovnice (6-25) dostaneme:

$$\begin{aligned} (x_d x_v \tan \beta_c) q_g^2 + [U_g^2 (x_v - x_d) \tan \beta_c - p_0 x_d x_v - q_0 (x_d x_v \tan \beta_c)] q_g + (x_d x_v \tan \beta_c) p_g^2 \\ + [U_g^2 (x_v + x_d) + q_0 x_d x_v - p_0 (x_d x_v \tan \beta_c)] p_g \\ + U_g^2 (-U_g^2 \tan \beta_c - q_0 x_v \tan \beta_c - p_0 x_v) = 0 \end{aligned} \quad (6-26)$$

Pro zjednodušení zavedeme následující substituce:

$$A = x_d x_v \tan \beta_c \quad (6-27)$$

$$B = U_g^2 (x_v - x_d) \tan \beta_c - p_0 x_d x_v \quad (6-28)$$

$$C = U_g^2 (x_v + x_d) + q_0 x_d x_v \quad (6-29)$$

$$D = U_g^2 (-U_g^2 \tan \beta_c - q_0 x_v \tan \beta_c - p_0 x_v) \quad (6-30)$$

S použitím substitucí se kvadratická rovnice (6-26) zjednoduší na tvar:

$$A * q_g^2 + (B - A * q_0) q_g + A * p_g^2 + (C - A * p_0) p_g + D = 0 \quad (6-31)$$

Rovnici (6-31) vydělíme členem A a dostaneme:

$$q_g^2 + \left(\frac{B}{A} - q_0\right) q_g + p_g^2 + \left(\frac{C}{A} - p_0\right) p_g + \frac{D}{A} = 0 \quad (6-32)$$

Kvadratická rovnice (6-32) má následující řešení:

$$q_{g1,2} = \frac{-\left(\frac{B}{A} - q_0\right) \pm \sqrt{\left(\frac{B}{A} - q_0\right)^2 - 4 \left[p_g^2 + \left(\frac{C}{A} - p_0\right) p_g + \frac{D}{A}\right]}}{2} \quad (6-33)$$

Následným řešením substituovaných výrazů získáme:

$$\frac{B}{A} = \frac{U_g^2 (x_v - x_d) \tan \beta_c - p_0 x_d x_v}{x_d x_v \tan \beta_c} = \frac{U_g^2 (x_v - x_d)}{x_d x_v} - \frac{p_0}{\tan \beta_c} \quad (6-34)$$

Pokud budeme uvažovat dovolený maximální zátěžný úhel $\beta_c = 90^\circ$, pak pro goniometrickou funkci tangens platí $\text{tg}(90^\circ) = \infty$, a v rovnici (6-34) je možné zanedbat člen s $\text{tg}(\beta_c)$:

$$\frac{B}{A} = \lim_{\beta_c \rightarrow 90^\circ} \left(\frac{U_g^2 (x_v - x_d)}{x_d x_v} - \frac{p_0}{\tan \beta_c} \right) = \frac{U_g^2 (x_v - x_d)}{x_d x_v} \quad (6-35)$$

Obdobně pro další substituce:

$$\frac{C}{A} = \lim_{\beta_c \rightarrow 90^\circ} \frac{U_g^2 (x_v + x_d) + q_0 x_d x_v}{x_d x_v \tan \beta_c} = 0 \quad (6-36)$$

$$\frac{D}{A} = \lim_{\beta_c \rightarrow 90^\circ} \frac{U_g^2 (-U_g^2 \tan \beta_c - q_0 x_v \tan \beta_c - p_0 x_v)}{x_d x_v \tan \beta_c} = -\frac{U_g^4}{x_d x_v} - \frac{U_g^2 q_0}{x_d} \quad (6-37)$$

Dosazením vztahů (6-35) až (6-37) do rovnice (6-33) dostaneme:

$$q_{g1,2} = \frac{\left(q_0 - \frac{U_g^2 (x_v - x_d)}{x_d x_v} \right) \pm \sqrt{\left(\frac{U_g^2 (x_v - x_d)}{x_d x_v} - q_0 \right)^2 - 4 \left[p_g^2 - p_g p_0 - \frac{U_g^4}{x_d x_v} - \frac{U_g^2 q_0}{x_d} \right]}}{2} \quad (6-38)$$

Protože řešení se znaménkem + u odmocniny nemá fyzikální význam, dostáváme po úpravě:

$$q_g = \frac{q_0}{2} + \frac{U_g^2 x_d - x_v}{2 x_d x_v} - \sqrt{\left(\frac{U_g^2 (x_v - x_d)}{2 x_d x_v} - \frac{q_0}{2} \right)^2 - p_g^2 + p_g p_0 + \frac{U_g^4}{x_d x_v} + \frac{U_g^2 q_0}{x_d}} \quad (6-39)$$

Rovnice (6-39) vyjadřuje závislost pro jalový výkon na svorkách generátoru, respektující meziodběr vlastní spotřebou. Kladné hodnoty q_g v rovnici (6-39) reprezentují práci generátoru v přebuzeném stavu a dodávku jalového výkonu do soustavy, záporné hodnoty pak práci stroje v podbuzeném stavu.

Takto vynesená křivka by v pracovním diagramu představovala spojnici pracovních bodů, ve kterých je při konstantním napětí na svorkách generátoru u_g celkový vnitřní úhel β_c (úhel mezi vnitřním napětím generátoru a napětím v pomyslném středu soustavy) roven 90° . Samotné omezení pracovní oblasti statickou stabilitou je však dáno maximálním dovoleným celkovým zátěžným úhlem a aktuálním napětím v rozvodně vyvedení výkonu (resp. soustavy). Napětí na svorkách generátoru se mění v závislosti na napětí v soustavě a velikosti činného výkonu daného regulátorem budícího proudu.

Vynesení křivky pro omezení statickou stabilitou ($\beta_c = 90^\circ$, $u_s = \text{konst.}$) lze získat spojením průsečíků křivky statické stability pro konstantní u_g (6-39) a odpovídající křivky pro u_g , $u_s = \text{konst.}$ (6-53), odvozené v kapitole 6.5.2. Požadované průsečíky jsou dopočítány iteračním výpočtem, který pro konstantní napětí v rozvodně vyvedení výkonu u_s dopočítá napětí generátoru u_g v každém bodě křivky tak, aby pro spočítané u_g platila rovnost výkonu získaného z (6-39) a (6-53). Podrobný výpočet průsečíků křivek je uveden v [Příloha 1].

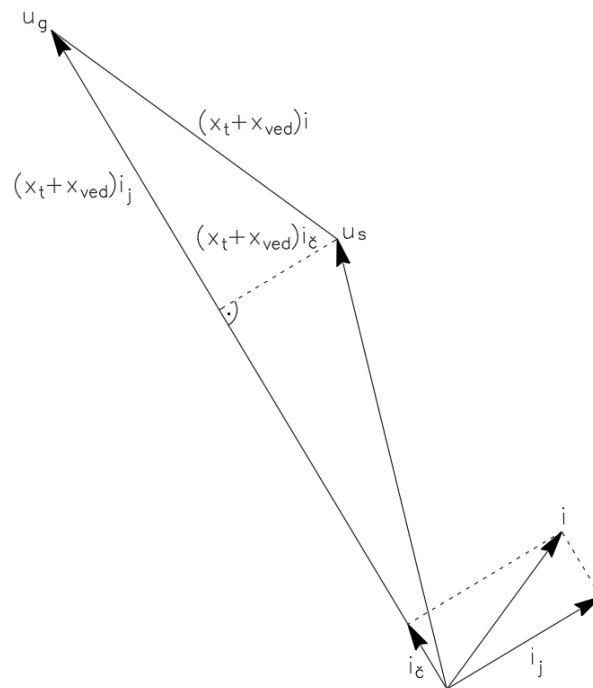
6.5 Odvození křivek pro u_g , $u_s = \text{konst.}$

Při tvorbě provozního diagramu a stanovení pracovní oblasti generátoru je třeba, mimo omezujících křivek statické stability, uvažovat rovněž omezení maximálním napětím soustavy a minimálním napětím v rozvodech vlastní spotřeby, viz kapitoly 4.3 a 4.5. K tomuto účelu slouží křivky (kružnice), spojující pracovní body generátoru, ve kterých je u_g a u_s konstantní. Těchto křivek se standardně do PQ diagramu vynášejí několik, pro jedno dané napětí soustavy u_s a různá napětí na svorkách generátoru u_g , např. $\langle 0,9 \div 1,1 \rangle u_g$.

Odvození vzorce pro křivky $u_g, u_s = \text{konst.}$ opět vychází z odvození provedeného v [1], doplněného o odběr vlastní spotřebou.

6.5.1 Zjednodušený fázorový diagram

Z náhradního schématu na Obr. 3-2 vychází zjednodušený fázorový diagram, zobrazující vztah mezi fázorem napětí na svorkách generátoru a fázorem napětí v rozvodně vyvedení výkonu, uvedený na Obr. 6-4.



Obr. 6-4: Zjednodušený fázorový diagram

6.5.2 Odvození vzorce pro $u_g, u_s = \text{konst.}$

Ze zjednodušeného fázorového diagramu na Obr. 6-4 lze odvodit následující vztahy:

$$u_s^2 = (u_g - (x_t + x_{ved})i_j)^2 + ((x_t + x_{ved})i_{\check{c}})^2 \quad (6-40)$$

$$u_s^2 = u_g^2 - 2 * u_g * (x_t + x_{ved})i_j + ((x_t + x_{ved})i_j)^2 + ((x_t + x_{ved})i_{\check{c}})^2 \quad (6-41)$$

$$u_s^2 - u_g^2 + 2 * u_g * (x_t + x_{ved})i_j - ((x_t + x_{ved})i_j)^2 - ((x_t + x_{ved})i_{\check{c}})^2 = 0 \quad (6-42)$$

Po vydělení rovnice (6-42) členem $(x_t + x_{ved})^2$ a úpravě dostaneme:

$$i_j^2 - i_j * \frac{2u_g}{x_t + x_{ved}} + i_{\check{c}}^2 + \frac{u_g^2 - u_s^2}{(x_t + x_{ved})^2} = 0 \quad (6-43)$$

Následně řešíme jako kvadratickou rovnici pomocí diskriminantu:

$$D = \left(-\frac{2u_g}{x_t + x_{ved}} \right)^2 - 4 * \left(i_{\check{c}}^2 + \frac{u_g^2 - u_s^2}{(x_t + x_{ved})^2} \right) \quad (6-44)$$

Řešení pro i_j pak vypadá následovně:

$$i_j = \frac{\frac{2u_g}{x_t + x_{ved}} \pm \sqrt{\left(\frac{2u_g}{x_t + x_{ved}} \right)^2 - 4 * \left(i_{\check{c}}^2 + \frac{u_g^2 - u_s^2}{(x_t + x_{ved})^2} \right)}}{2} \quad (6-45)$$

Jelikož řešení se znaménkem + před odmocninou nemá fyzikální význam, dostáváme jedno řešení, pro které po úpravě platí:

$$i_j = \frac{u_g}{x_t + x_{ved}} - \sqrt{\frac{u_g^2}{(x_t + x_{ved})^2} - \left(i_{\check{c}}^2 + \frac{u_g^2 - u_s^2}{(x_t + x_{ved})^2} \right)} \quad (6-46)$$

$$i_j = \frac{u_g}{x_t + x_{ved}} - \sqrt{-i_{\check{c}}^2 + \frac{u_s^2}{(x_t + x_{ved})^2}} \quad (6-47)$$

Vynásobením rovnice (6-47) členem u_g dostaneme:

$$i_j * u_g = \frac{u_g^2}{x_t + x_{ved}} - \sqrt{-i_{\check{c}}^2 * u_g^2 + \frac{u_s^2 * u_g^2}{(x_t + x_{ved})^2}} \quad (6-48)$$

Následně využijeme vztahů pro činný a jalový výkon generátoru:

$$p = u_g * i_{\check{c}} \qquad q = u_g * i_j \quad (6-49)$$

Dosazením vztahů (6-49) do rovnice (6-48) dostaneme:

$$q = \frac{u_g^2}{x_t + x_{ved}} - \sqrt{\frac{u_s^2 * u_g^2}{(x_t + x_{ved})^2} - p^2} \quad (6-50)$$

Rovnice (6-50) vyjadřuje poměrný jalový výkon q , dodávaný do soustavy při napětí na svorkách generátoru u_g , napětí v rozvodně vyvedení výkonu u_s a sumě reaktancí $x_t + x_{ved}$. Obdobně jako v případě odvození křivky statické stability platí, že výkon na svorkách generátoru je roven součtu výkonu dodávanému do soustavy a výkonu odebraného vlastní spotřebou. Platí tedy:

$$p_g = p + p_0 \qquad q_g = q + q_0 \quad (6-51)$$

$$p = p_g - p_0 \qquad q = q_g - q_0 \quad (6-52)$$

Dosazením rovnic (6-52) do rovnice (6-50) dostáváme vztah pro jalový výkon q_g , dodávaný generátorem do soustavy, při uvažování meziodběru vlastní spotřebou:

$$q_g = \frac{u_g^2}{x_t + x_{ved}} - \sqrt{\frac{u_s^2 * u_g^2}{(x_t + x_{ved})^2} - (p_g - p_0)^2} + q_0 \quad (6-53)$$

Obdobně jako pro odvození v kapitole 6.4.4, kladné hodnoty q_g v rovnici (6-53) reprezentují práci generátoru v přebuzeném stavu a dodávku jalového výkonu do soustavy, záporné hodnoty pak práci stroje v podbuzeném stavu.

6.6 Odvození křivek pro $u_r = \text{konst.}$

Omezení maximálním napětím, popsané v kapitole 4.3, platí pro všechna místa v přenosové cestě, tedy i v uzlu za blokovým transformátorem. V náhradním schématu (viz Obr. 6-2) je napětí v tomto uzlu značeno u_r . Protože napětí u_r je větší (o úbytek na reaktanci blokové linky) než napětí u_s v rozvodně, do které je vyváděn výkon, představuje křivka, spojující pracovní body, při kterých je napětí za blokovým transformátorem u_r konstantní, ještě přísnější omezení pracovní oblasti generátoru než křivky dané omezením maximálním napětím u_s v rozvodně vyvedení výkonu, odvozené v kapitole 6.5.

Pro vynesení závislosti jalového na činném výkonu $q = f(p)$ při $u_r = \text{konst.}$ lze použít rovnici (6-53), odvozenou v kapitole 6.5.2, s parametry u_g a u_r . To bohužel nelze jednoduše analyticky vyjádřit, jelikož napětí za blokovým transformátorem u_r závisí na:

- napětí na svorkách generátoru u_g ,
- napětím v rozvodně vyvedení výkonu u_s ,
- reaktanci blokového transformátoru x_t ,
- reaktanci linky vyvedení výkonu x_{ved} ,
- činném výkonu generátoru p_g ,
- výkonu odebíraném vlastní spotřebou p_0 .

Z tohoto důvodu byl použit výpočet, který pro každou hodnotu činného výkonu generátoru p_g iterační metodou stanoví hodnotu u_g tak, aby platilo $u_r = \text{konst.}$ Získané hodnoty napětí generátoru byly následně dosazovány do rovnice (6-53), a z výsledných jalových výkonů sestavena křivka pro $u_r = \text{konst.}$, představující další potenciální omezení pracovního diagramu.

Omezení maximálním napětím za blokovým transformátorem $u_r = \text{konst.}$ se projeví především při vyšším napětí v soustavě u_s , při nižších hodnotách se již neprojeví.

6.7 Odvození u_g pro minimální přípustné napětí vlastní spotřeby

Omezení pracovní oblasti generátoru minimálním napětím v rozvodu vlastní spotřeby, popsané v kapitole 4.5, je dáno konstrukčními vlastnostmi transformátoru, napájecího vlastní spotřeby. Odvození je provedeno pro trojvintuťový odbočkový transformátor, na primární straně vybavený přepínačem odboček a vychází z následujících předpokladů:

- odběr vlastní spotřeby je konstantní,
- zatížení je na sekundárním a terciálním vinutí transformátoru rozloženo rovnoměrně.

Při zohlednění uvedených předpokladů lze minimální přípustné svorkové napětí generátoru u_{gmin} stanovit jako součin minimální dovolené hodnoty napětí v rozvodu vlastní spotřeby u_{0min} a převodu transformátoru p , rozšířeného o úbytek napětí na transformátoru Δu . Platí tedy rovnice:

$$u_{gmin} = u_{0min} * p + \Delta u \quad (6-54)$$

Převod transformátoru stanovíme dle vzorce:

$$p = \frac{u_{n1} + (odb * u_{n1})}{u_{n2}} \quad (6-55)$$

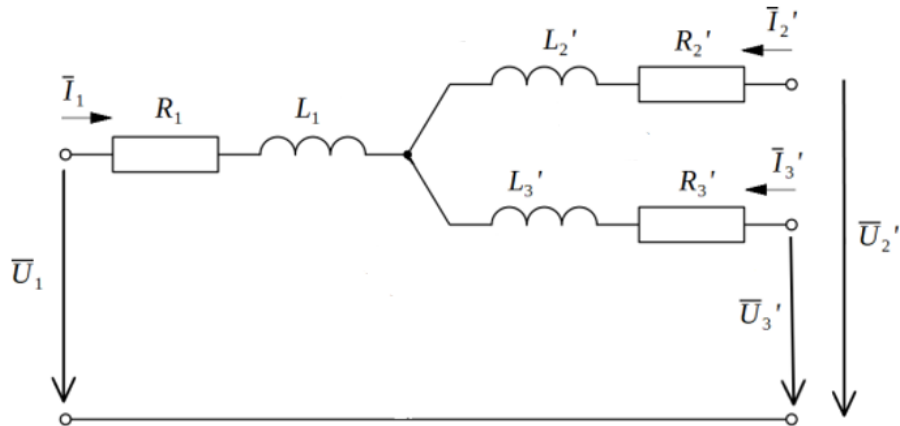
kde:

U_{n1}jmenovité napětí na primární straně transformátoru,

U_{n2}jmenovité napětí na sekundární straně transformátoru,

odbzvolená odbočka, zadaná v % (při výpočtu minimálního napětí volíme odbočku pro nejmenší převod).

Pro stanovení napětí u_{gmin} potřebujeme spočítat úbytek napětí na transformátoru. Úbytek napětí lze stanovit jako rozdíl velikosti napětí na primární a sekundární straně transformátoru (po převedení velikosti napětí sekundární strany na stranu primární přes jmenovitý převod). Podrobný postup tohoto výpočtu je uveden v [15]. Pro zjednodušení jsou zde, narozdíl od postupu v [15], zanedbány úbytky napětí na rezistancích jednotlivých vinutí. Náhradní schéma trojvintuťového transformátoru, se zanedbáním magnetizačního proudu (u generátorů větších výkonů lze pro zjednodušení magnetizační reaktanci považovat za nekonečnou) je na Obr. 6-5.



Obr. 6-5: Náhradní schéma trojvinutového transformátoru

Pro výpočet úbytku napětí na transformátoru potřebujeme znát jeho reaktance. Při odvození vztahů pro reaktance jednotlivých vinutí vyjdeme z principu měření nakrátko.

Měření nakrátko se provádí při zkratovaném sekundárním vinutí transformátoru, kdy je transformátor napájen sníženým napětím tak, aby jeho primárním vinutím protékal jmenovitý proud. Změřené napětí se nazývá napětí nakrátko a je jedním ze základních parametrů každého transformátoru, charakterizující ztráty ve vinutích (tzv. v „mědi“).

Pro napětí nakrátko lze konstatovat, že odpovídá impedanci vinutí nakrátko, platí tedy:

$$\hat{u}_k \approx \hat{z}_k \quad \hat{z}_k = r_k + j * x_k \quad (6-56)$$

Protože zanedbáváme při výpočtu úbytek na rezistanci vinutí, lze uvažovat:

$$u_k \approx x_k \quad (6-57)$$

U trojvinutových transformátorů se při měření napětí nakrátko mezi 2 vinutími vždy jedno vinutí neuplatní. Pro napětí nakrátko trojvinutového transformátoru platí:

$$u_{k12} = x_1 + x_2 \quad (6-58)$$

$$u_{k13} = x_1 + x_3 \quad (6-59)$$

$$u_{k23} = x_2 + x_3 \quad (6-60)$$

Úpravou rovnic (6-58) až (6-60) dostáváme:

$$x_1 = u_{k12} - x_2 = u_{k12} - (u_{k23} - x_3) = u_{k12} - u_{k23} + u_{k13} - x_1 \quad (6-61)$$

$$2x_1 = u_{k12} + u_{k13} - u_{k23} \quad (6-62)$$

$$x_1 = \frac{u_{k12} + u_{k13} - u_{k23}}{2} \quad (6-63)$$

Stejným způsobem lze odvodit vztahy pro reaktance zbylých vinutí transformátoru:

$$x_2 = \frac{u_{k12} + u_{k23} - u_{k13}}{2} \quad (6-64)$$

$$x_3 = \frac{u_{k13} + u_{k23} - u_{k12}}{2} \quad (6-65)$$

Pro stanovení úbytku napětí dále potřebujeme znát hodnotu maximálního proudu, který poteče sekundárním vinutím, bude-li ve vlastní spotřebě minimální dovolené napětí. Proud získáme ze vztahu:

$$i_{2max} = \frac{S_0}{\sqrt{3} * u_{0min}} \quad (6-66)$$

kde:

S_0 zdánlivý výkon odebíraný vlastní spotřebou

u_{0min}minimální dovolené napětí vlastní spotřeby

Jako poslední potřebujeme znát argument komplexního zdánlivého výkonu, odebíraného vlastní spotřebou:

$$\hat{s}_0 = p_0 + j * q_0 \quad \varphi = \tan^{-1} \left(\frac{q_0}{p_0} \right) \quad (6-67)$$

Nyní již můžeme stanovit výsledný vztah pro maximální úbytek napětí na trojvinutovém transformátoru:

$$\Delta u = \sqrt{3} * [2 * x_1 + \max(x_2, x_3)] * i_{2max} * \sin(-\varphi) \quad (6-68)$$

Ve vzorci je úhel φ uvažován záporně, protože v souladu se znaménkovou konvencí, definovanou v kapitole 6.1, je odběr jalového výkonu vlastní spotřebou záporný. Max ve vzorci znamená, že pro získání maximálního úbytku je potřeba dosadit větší z reaktancí sekundárního, nebo terciálního vinutí.

Nyní již stačí dosadit jmenovitý poměr, získaný rovnicí (6-55), maximální úbytek na transformátoru z rovnice (6-68) do rovnice (6-54) a dostaneme poměrnou hodnotu minimálního svorkového napětí na generátoru u_{gmin} . Provoz generátoru s hodnotou nižší by znamenal nedovolený pokles napětí v rozvodech vlastní spotřeby.

Hodnotu u_{gmin} lze dosadit za u_g do rovnice (6-53), odvozenou v kapitole 6.5.2 a získat křivku v provozním diagramu stroje, charakterizující omezení minimálním napětím vlastní spotřeby elektrárenského bloku.

6.8 PQ diagramy – fázorová metoda

Na Obr. 6-6 až Obr. 6-8 jsou vyneseny pracovní PQ diagramy turbogenerátoru ETE 1, pro 3 různá napětí v soustavě (420, 410 a 400 kV) a frekvenci 50 Hz. Diagramy jsou sestaveny pro generátor s parametry stanovenými v kapitole 5. Diagramy obsahují omezení pracovní oblasti, popsána v kapitole 4.

Omezení dané vlastnostmi stroje bylo stanoveno výrobcem [5], omezení mechanickým výkonem turbíny vychází z tepelných schémat, zpracovaných v rámci realizace zvýšení výkonu ETE a platí pro teplotu chladicí vody 13 °C. Ostatní omezení jsou spočítány pomocí vztahů, odvozených v kapitole 6.

6.8.1 Omezovací křivky

Modrá křivka představuje omezení generátoru z hlediska dovoleného oteplení jednotlivých komponent stroje. Křivka je vynesena pro jmenovité napětí generátoru, frekvenci 50 Hz, teplotu chladicí vody 33 °C, teplotu vodíku 47 °C a tlak vodíku 600 kPa.

Šedé křivky spojují pracovní body, ve kterých je zadaná hodnota napětí generátoru u_g konstantní, vyneseno pro hodnoty $u_g = <0,85 - 1,1>$. Šedá křivka označena u_{gmin} platí pro hodnotu u_g z hlediska omezení minimálním napětím vlastní spotřeby (viz kapitola 6.7). Ve všech případech je toto omezení daleko za omezením statickou stabilitou/strojem.

Černá čárkovaná křivka značí omezení turbínou, tedy maximální mechanický výkon, který je schopna dodat parní turbína.

Zelená křivka reprezentuje omezení maximálním napětím za blokovým transformátorem, definované v kapitole 6.6. Křivka pro $U_r = 1$ je vynesena pouze v PQ diagramu pro napětí soustavy $U_s = 420$ kV, kde představuje značné omezení provozu v přebuzené oblasti. V ostatních případech křivka přesahuje měřítko diagramů.

Červená a oranžová křivka udávají omezení statickou stabilitou. Vzorec pro výpočet statické stability byl odvozen v kapitole 6.4. Křivky jsou spočítány pro různé reaktance vnější soustavy x_{soust} , definované v kapitole 5.6, kdy:

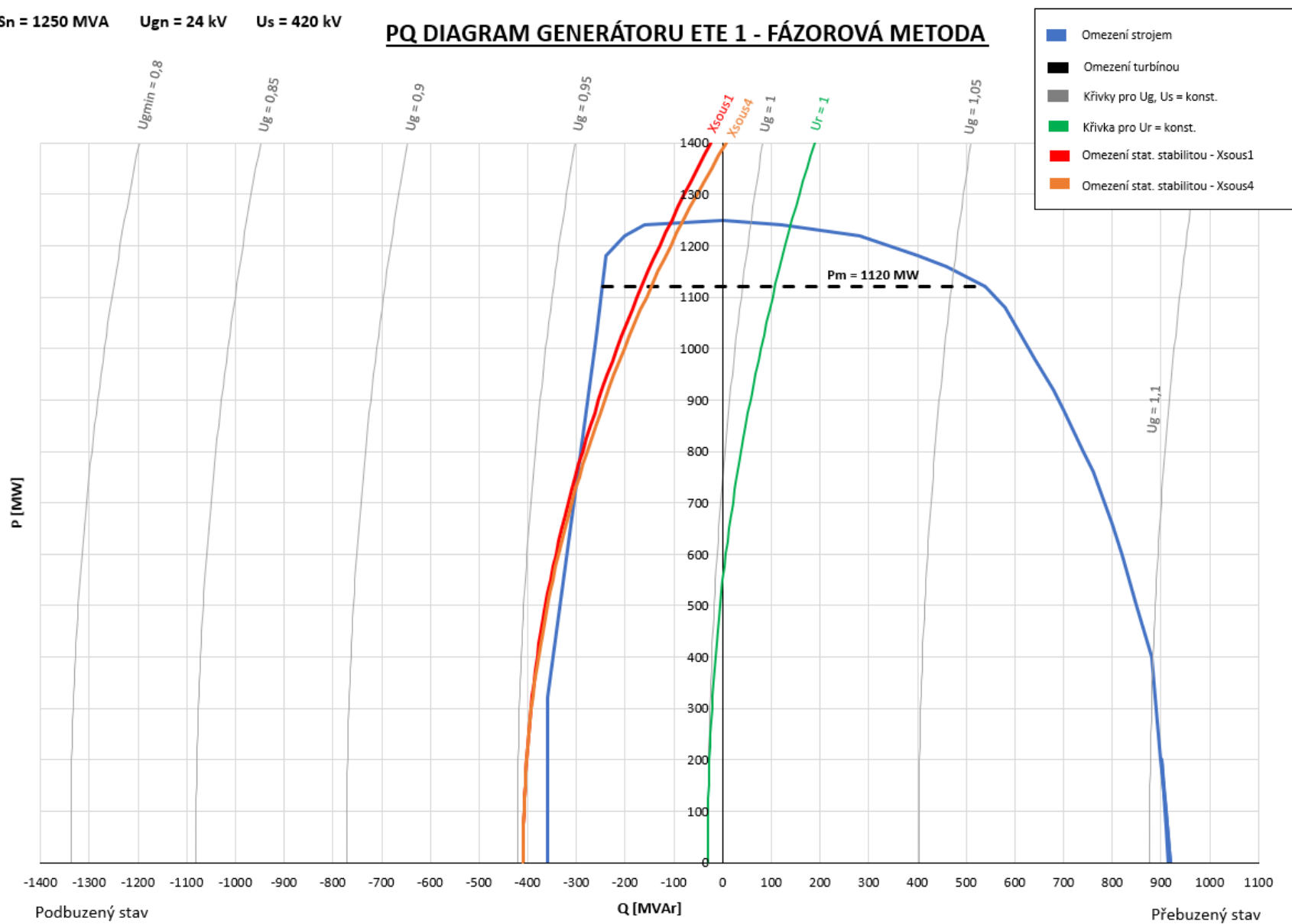
- červená křivka pro x_{soust1} , kdy jsou v provozu všechny linky v rozvodně R400 kV Kočín a kompenzační tlumivka je vypnuta (z hlediska statické stability nejprůzračnější případ),
- oranžová křivka pro x_{soust4} , kde jsou mimo provoz 2 vývodové linky i tlumivka (nejméně příznivý případ).

Podrobný výpočet křivek jednotlivých omezení je uveden v [Příloha 1].

6.8.2 Diagram pro $U_s = 420$ kV

$S_n = 1250$ MVA $U_{gn} = 24$ kV $U_s = 420$ kV

PQ DIAGRAM GENERÁTORU ETE 1 - FÁZOROVÁ METODA

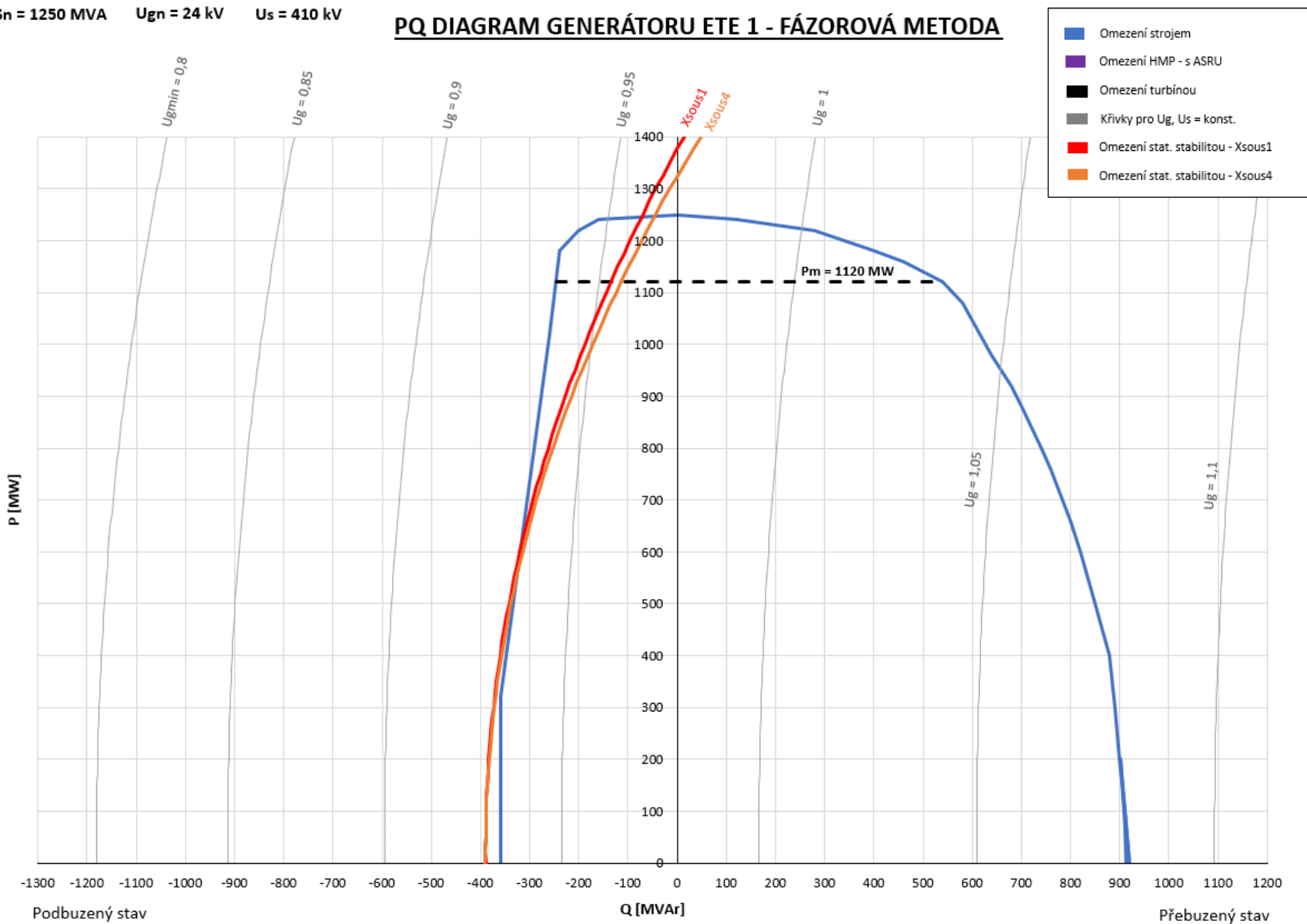


Obr. 6-6: PQ diagram - $U_s = 420$ kV

6.8.3 Diagram pro $U_s = 410$ kV

$S_n = 1250$ MVA $U_{gn} = 24$ kV $U_s = 410$ kV

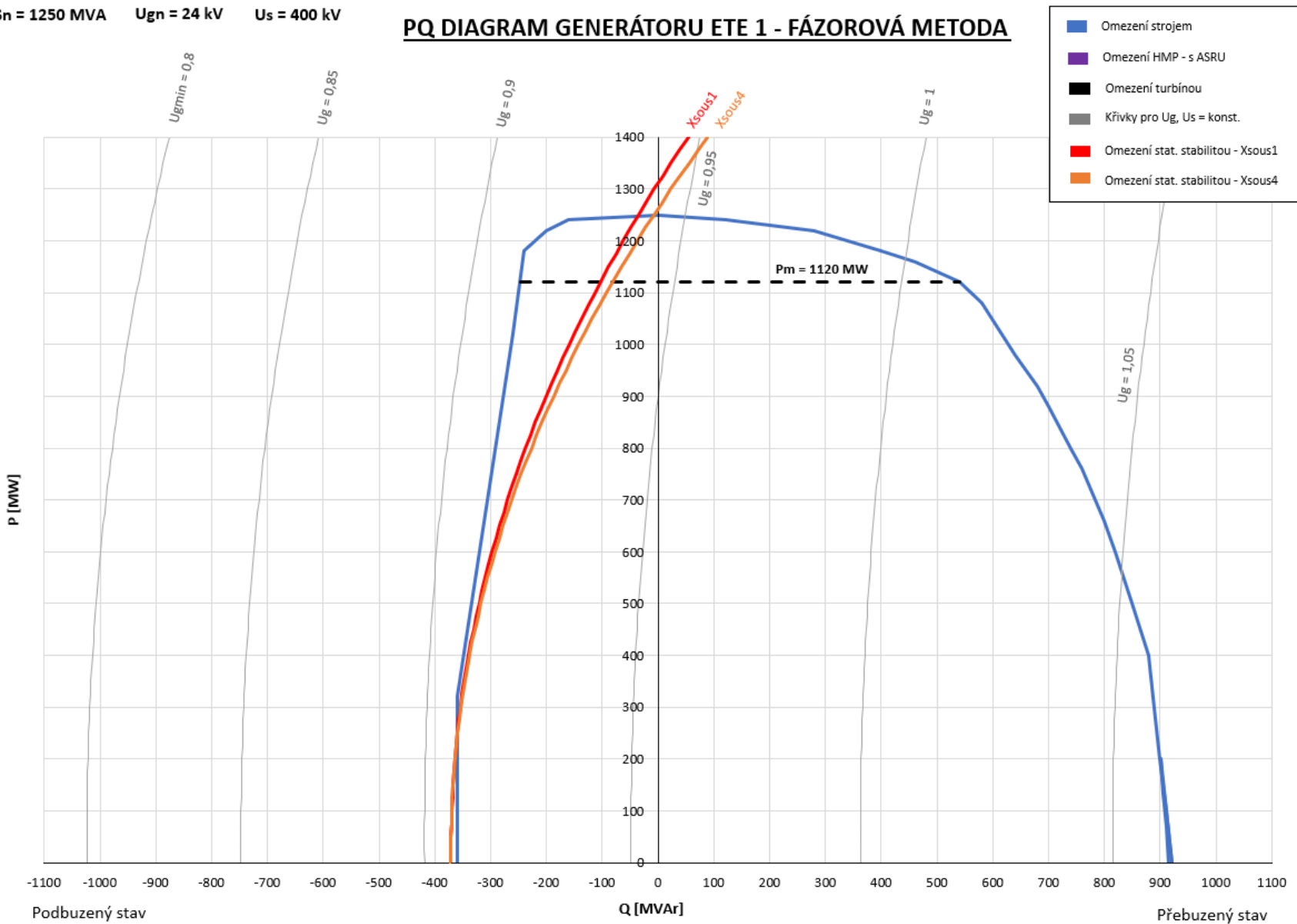
PQ DIAGRAM GENERÁTORU ETE 1 - FÁZOROVÁ METODA



Obr. 6-7: PQ diagram - $U_s = 410$ kV

6.8.4 Diagram pro $U_s = 400$ kV

$S_n = 1250$ MVA $U_{gn} = 24$ kV $U_s = 400$ kV



Obr. 6-8: PQ diagram - $U_s = 400$ kV

7. DYNAMICKÝ VÝPOČET STATICKÉ STABILITY

Dalším způsobem, jak stanovit statickou stabilitu je využití dynamických simulací. Existuje mnoho programů, které umožňují modelovat celé soustavy a simulovat tak jejich chování v reálných podmínkách.

7.1 Výpočtový program

Pro dynamické simulace byl využit výpočtový program NEPLAN v10.0.9.1. Program je vyvíjen švýcarskou společností NEPLAN AG a poskytuje komplexní služby pro analýzu elektrických a strojních systémů. Obsahuje moduly pro výpočet zkratových proudů, ustálených stavů sítě, dynamických procesů, harmonické analýzy a mnoho dalších.

7.2 Parametry

Model, vytvořený v programu NEPLAN, vychází z parametrů stanovených v kapitole 5. Model je rozšířen o další prvky, potřebné pro dynamický výpočet.

7.2.1 Přenosová soustava

Výhodou dynamických výpočtů je možnost, oproti fázorové metodě, simulovat přenosovou soustavu podrobněji, než pouze její pomyslnou reaktancí. Do modelu byla pro potřeby výpočtu zanesena napěťová hladina 400 kV přenosové soustavy ČR. Model obsahuje všechny rozvodny 400 kV, jejich propojující přenosové linky a významné elektrárenské bloky, modelovaných včetně regulace buzení generátorů. Podklady pro vytvoření modelu poskytla společnost ČEPS [20].

Jsou modelovány generátory následujících elektráren:

- Temelín (2 × 1120 MW)
- Dukovany (8 × 255 MW)
- Prunéřov II (3 × 250 MW)
- Tušimice II (4 × 200 MW)
- Chvaletice (4 × 205 MW)
- Počeradý (5 × 200 MW)

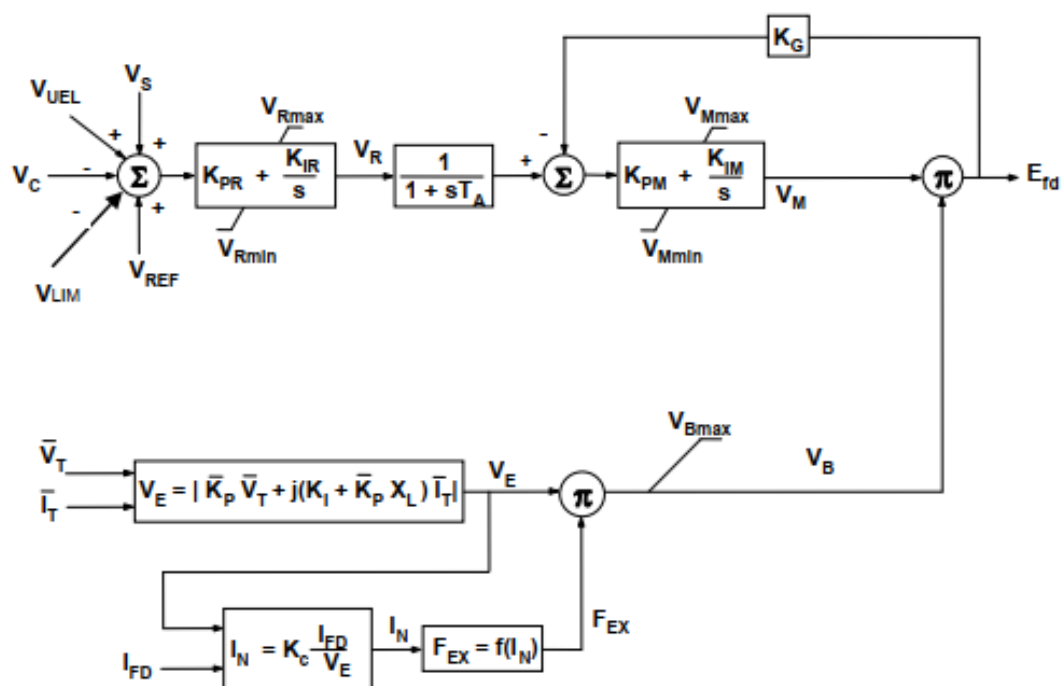
Celkový modelovaný výkon činí 7 650 MW, což představuje přibližně 36 % celkového instalovaného výkonu ČR [14].

7.2.2 Regulátor buzení generátoru

Parametry nastavení regulátoru buzení generátoru byly převzaty z [21]. Generátor v ETE je vybaven regulátorem PRIMIS 186, viz kapitola 5.1.1.2. Ve výpočetním programu NEPLAN je použit model regulátoru ST4B, definovaný v [23].

Tab. 7-1: Vybrané parametry regulátoru buzení ST4B [21]

Parametr	Hodnota	Jednotka
Proporcionální zisk regulátoru K_{PR}	8	-
Integrační zisk regulátoru K_{IR}	2	-
Časová konstanta regulátoru T_A	0,003	s
Maximální výstup regulátoru V_{Rmax}	3,2	-
Minimální výstup regulátoru V_{Rmin}	-2,8	-
Stropní buzení V_{Bmax}	6,74	-
Faktor zatížení usměrňovače daný komutační reaktancí K_c	0,48	-



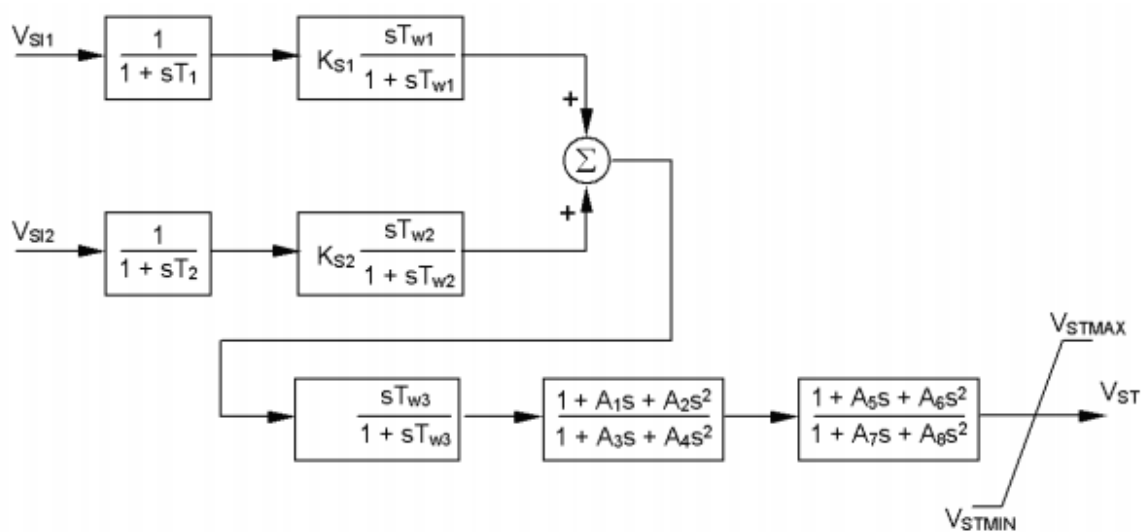
Obr. 7-1: Model budícího systému ST4B (obr. 7-4 v [23])

7.2.3 Systémový stabilizátor

Další nedílnou součástí regulátoru buzení je systémový stabilizátor (PSS). Úkolem stabilizátoru je tlumit kývání rotoru a zvýšit stabilitu v přechodných stavech. Výstupem PSS je stabilizační signál, který následně vstupuje do regulační smyčky regulátoru, vstupem pak frekvence vnitřního elektromotorického napětí generátoru, činný výkon a budící proud. Nastavení PSS bylo převzato z [22], v NEPLANU je použit standardizovaný model PSS3B, definovaný v [23].

Tab. 7-2: Vybrané parametry stabilizátoru [22]

Parametr	Hodnota	Jednotka
Koeficient zesílení stabilizace od f_{uig}	320	$100 \times p.j.$
Derivační časová konstanta f_{uig}	350	ms
Koeficient zesílení stabilizace od P	54	$100 \times p.j.$
Derivační časová konstanta P	350	ms
Koeficient zesílení stabilizace od I_f	11	$100 \times p.j.$
Derivační časová konstanta I_f	350	ms



Obr. 7-2: Model systémového stabilizátoru PSS3B (obr. 8-3 v [23])

7.3 Způsob výpočtu

Protože výpočetní program neumožňuje automaticky simulovat chování v celém rozsahu pracovní oblasti generátoru, bylo chování generátoru zkoumáno pomocí postupného snižování napětí pro několik výchozích hladin činného výkonu.

Metoda postupného snižování napětí spočívá v postupném odbuzování generátoru, kdy je pro danou výchozí hodnotu činného a jalového výkonu snižováno napětí na svorkách generátoru plynulou změnou referenční hodnoty napětí (V_{REF} v Obr. 7-1) v regulátoru buzení.

Simulace probíhá výpočtem ustáleného chodu sítě Newton - Raphsonovou metodou a následně v čase 3 sekundy zahájením odbuzování generátoru. Vzhledem k časové náročnosti a množství prováděných simulací je nastavena podmínka, která ukončí simulaci, pokud vnější zátěžný úhel překročí hodnotu 100° .

Simulace jsou provedeny pro 2 topologie sítě, 3 hladiny napětí v rozvodně 400 kV Kočín a pro následující 4 hodnoty činného výkonu:

- $P_g = 1\,120$ MW (99,5 % P_n)
- $P_g = 840$ MW (74,6 % P_n)
- $P_g = 560$ MW (49,7 % P_n)
- $P_g = 280$ MW (24,8 % P_n)

U všech výchozích činných výkonů je uvažován provoz v přebuzeném stavu, s dodávkou jalového výkonu $Q_g = 10$ MVar do sítě. Tato hodnota byla zvolena proto, aby šla použít i při vyšších napětích sítě a nižších činných výkonech, kde se uplatní omezení maximálním napětím za blokovým transformátorem. Dle Obr. 6-8 již nelze, při napětí v rozvodně Kočín 420 kV a hodnotě činného výkonu nižší než 550 MW, provozovat generátor v přebuzeném stavu, nicméně díky dostatečnému dimenzování transformátoru a vedení lze takový chod krátkodobě uvažovat.

Vyhodnocením průběhů sledovaných veličin je stanovena hodnota jalového výkonu v podbuzeném stavu, při které dosáhne celkový zátěžný úhel hodnoty 90° .

Takto získané hodnoty jalového výkonu jsou následně vyneseny do PQ diagramů.

7.4 Výsledky výpočtu

Výsledné průběhy sledovaných veličin jsou vyneseny v grafech v následujících podkapitolách. Simulace byla provedena pro 3 napěťové hladiny: 420, 410 a 400 kV. Hladina napětí je zadávána jako referenční hodnota v regulačním uzlu (pro elektrárnu Temelín rozvodna Kočín).

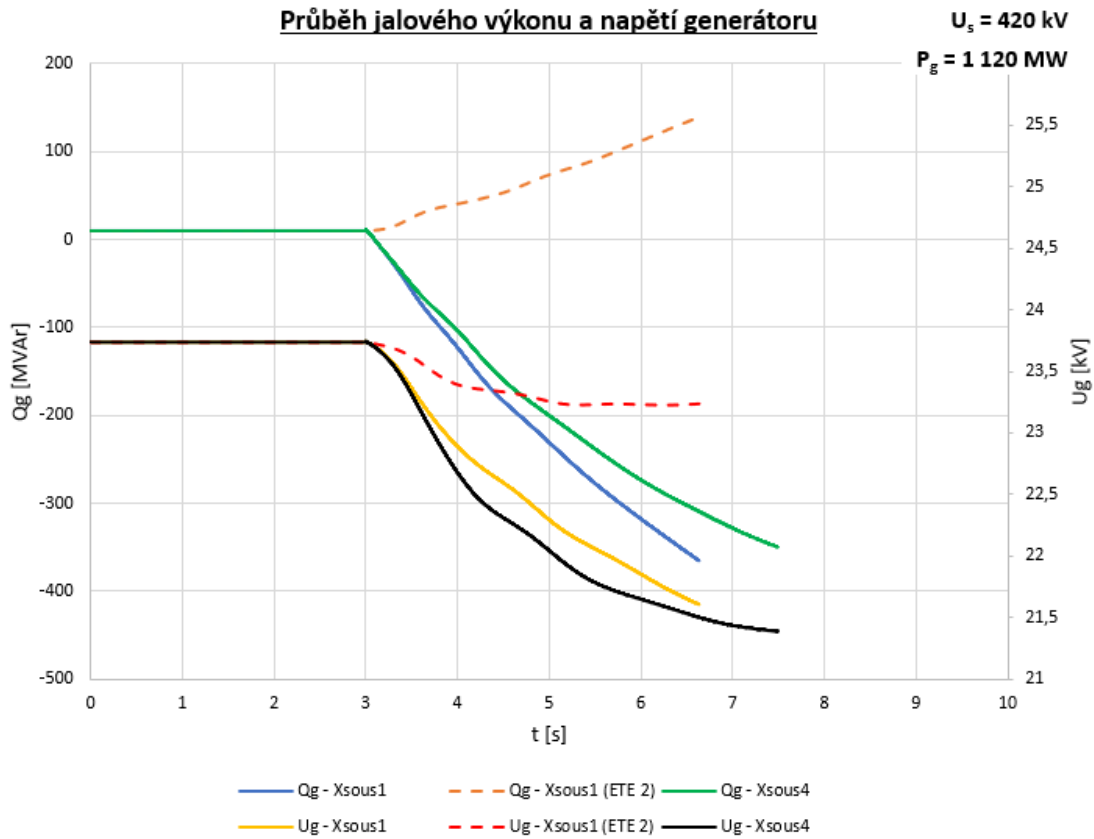
Pro každou napěťovou hladinu je vynesena průběh jalového výkonu, celkového zátěžného úhlu a napětí generátoru odbuzovaného generátoru ETE 1 ve dvou variantách dle topologie sítě, odpovídající parametrům soustavy, definovaným v kapitole 5.6 a použitých v kapitole 6:

- X_{sous1} : všechny linky rozvodny Kočín jsou v provozu
- X_{sous4} : linky V475 (Kočín – Řeporyje) a V433 (Kočín – Dasný – Slavětice) jsou vypnuty

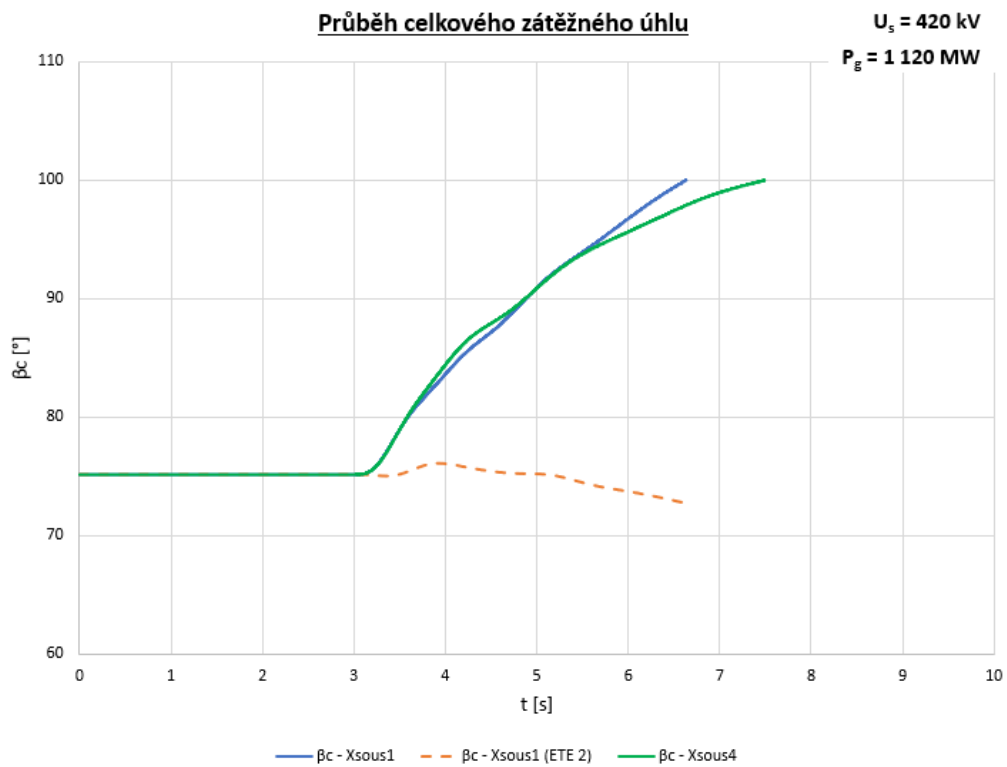
Dále jsou pro variantu topologie X_{sous1} vyneseny průběhy pro generátor ETE 2 druhého bloku jaderné elektrárny Temelín (čárkované křivky).

Z průběhů je patrné, že odbuzováním, tedy zmenšováním budícího napětí a proudu, dochází k postupnému poklesu hodnoty jalového výkonu (resp. zvyšování záporné hodnoty vzhledem ke zvolené znaménkové konvenci), snižování napětí generátoru a zvyšování celkového zátěžného úhlu. Z průběhů čárkovaných křivek pro generátor ETE 2 druhého bloku elektrárny je zřejmé, že dochází naopak k přibuzování, tedy práci proti změně způsobené odbuzováním generátoru ETE 1 a snaze zachování rovnovážného stavu v soustavě.

7.4.1 Průběh veličin pro $U_s = 420$ kV

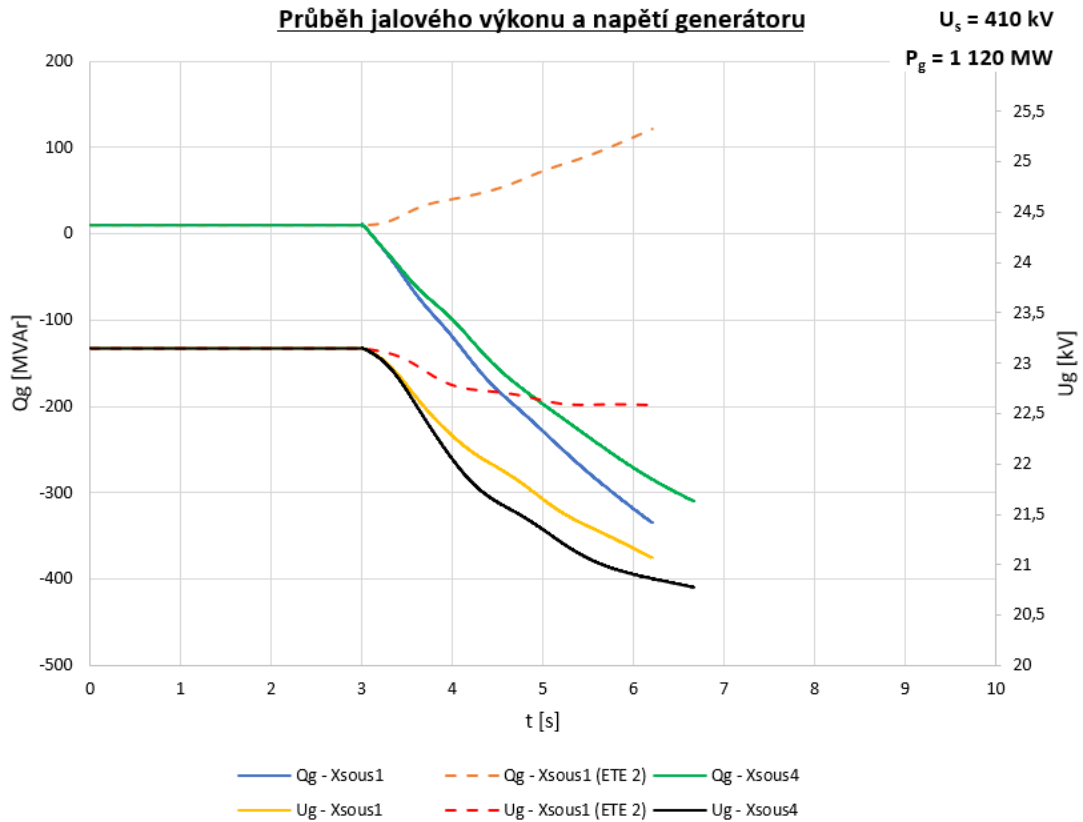


Obr. 7-3: Průběh Q_g a U_g - 420 kV

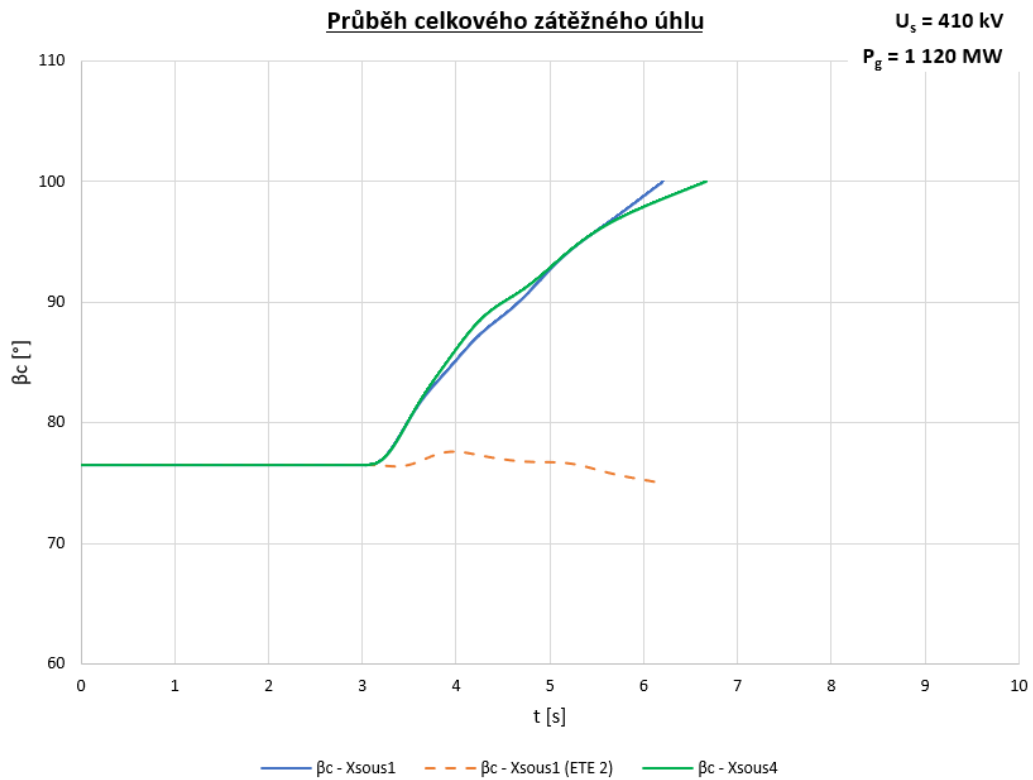


Obr. 7-4: Průběh β_c - 420 kV

7.4.2 Průběh veličin pro $U_s = 410$ kV

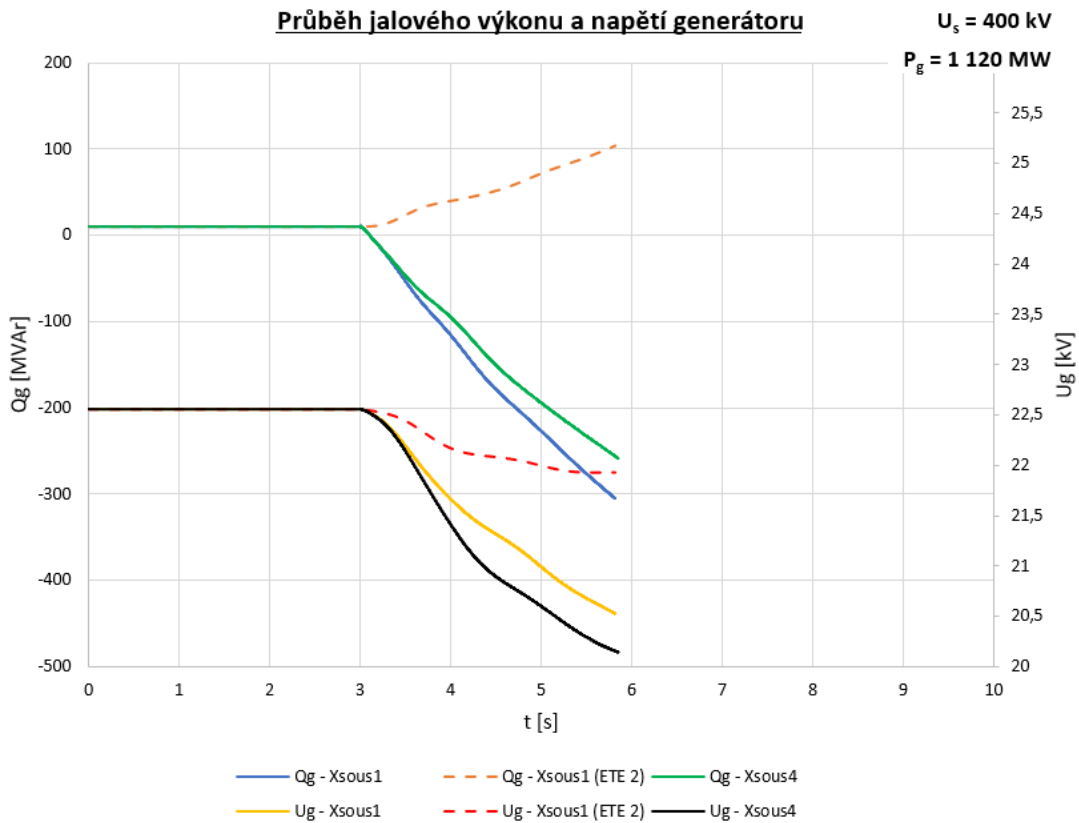


Obr. 7-5: Průběh Q_g a U_g - 410 kV

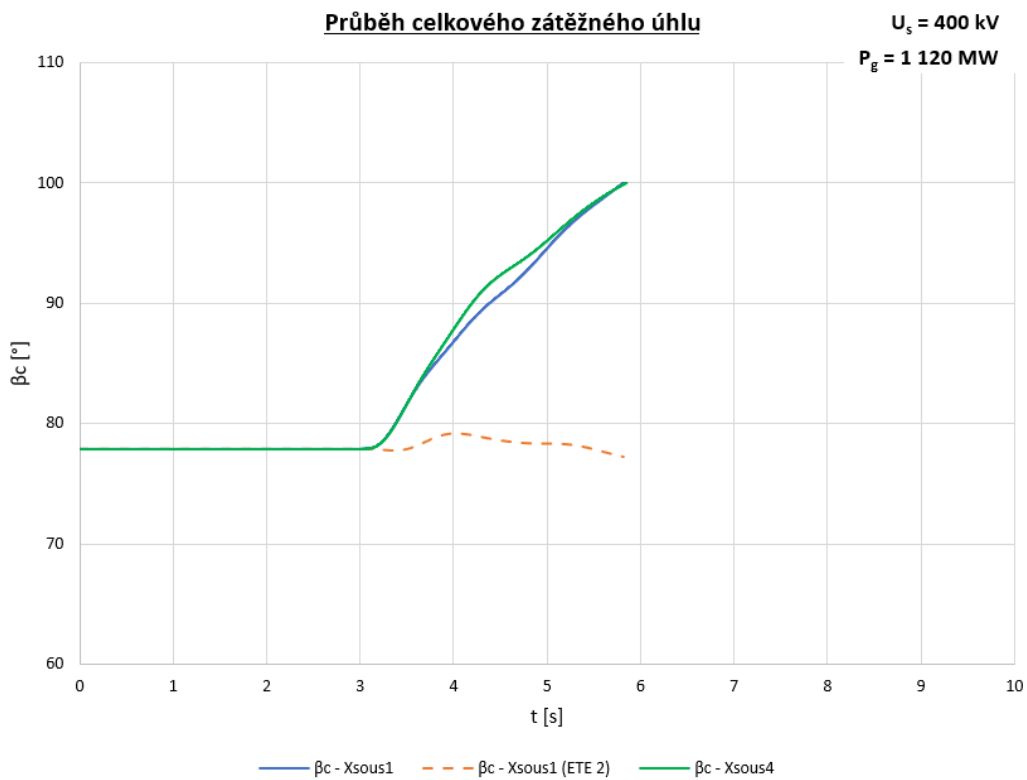


Obr. 7-6: Průběh β_c - 410 kV

7.4.3 Průběh veličin pro $U_s = 400$ kV



Obr. 7-7: Průběh Q_g a U_g - 400 kV



Obr. 7-8: Průběh β_c - 400 kV

7.4.4 Výsledky dynamických simulací

Výsledky provedených simulací jsou uvedeny v Tab. 7-3. V tabulce jsou zaznamenány výchozí hodnoty v počátku simulace a hodnoty v okamžiku, kdy celkový zátěžný úhel dosáhne hodnoty 90°.

Tab. 7-3: Výsledky dynamických simulací

Poř. číslo	Topologie sítě	Počátek simulace					Výsledek simulace			
		Činný výkon Pg [MW]	Napětí soustavy Us [kV]	Jalový výkon Qg [MVar]	Napětí generátoru Ug [kV]	Celkový zátěžný úhel β_c [°]	Napětí soustavy Us [kV]	Jalový výkon Qg [MVar]	Napětí generátoru Ug [kV]	Celkový zátěžný úhel β_c [°]
0	Xsous1	1120	420	10	23,74	75,14	409,06	-219,42	22,37	90
1	Xsous1	840	420	10	23,83	66,57	408,57	-295,91	22,19	90
2	Xsous1	560	420	10	23,89	53,74	409,34	-350,49	22,14	90
3	Xsous1	280	420	10	23,92	32,50	409,89	-382,29	22,11	90
4	Xsous1	1120	410	10	23,15	76,50	399,66	-197,13	21,87	90
5	Xsous1	840	410	10	23,25	68,01	398,54	-271,06	21,67	90
6	Xsous1	560	410	10	23,31	55,25	399,35	-329,59	21,60	90
7	Xsous1	280	410	10	23,35	33,79	400,07	-363,53	21,58	90
8	Xsous1	1120	400	10	22,56	77,88	390,01	-166,02	21,38	90
9	Xsous1	840	400	10	22,66	69,47	388,66	-248,56	21,15	90
10	Xsous1	560	400	10	22,73	56,80	389,36	-308,99	21,07	90
11	Xsous1	280	400	10	22,77	35,15	390,24	-345,14	21,04	90
12	Xsous4	1120	420	10	23,74	75,12	403,38	-190,86	22,12	90
13	Xsous4	840	420	10	23,83	66,57	404,42	-279,49	22,01	90
14	Xsous4	560	420	10	23,89	53,74	406,42	-339,88	22,00	90
15	Xsous4	280	420	10	23,92	32,50	406,80	-373,07	21,95	90
16	Xsous4	1120	410	10	23,15	76,50	393,26	-155,71	21,62	90
17	Xsous4	840	410	10	23,25	68,01	393,99	-252,59	21,46	90
18	Xsous4	560	410	10	23,32	55,25	396,44	-319,18	21,46	90
19	Xsous4	280	410	10	23,35	33,79	396,99	-354,41	21,42	90
20	Xsous4	1120	400	10	22,56	77,88	383,62	-116,44	21,16	90
21	Xsous4	840	400	10	22,66	69,47	383,36	-226,68	20,90	90
22	Xsous4	560	400	10	22,73	56,80	386,38	-298,26	20,93	90
23	Xsous4	280	400	10	22,77	35,15	387,21	-336,21	20,89	90

7.5 PQ diagramy – dynamický výpočet

Na Obr. 7-9 až Obr. 7-11 jsou vyneseny PQ diagramy s omezující křivkou statické stability, stanovenou dynamickým výpočtem, pro 3 hladiny napětí U_s v rozvodně 400 kV Kočín a frekvenci soustavy 50 Hz.

Obdobně jako v kapitole 6.8, je v PQ diagramu zobrazeno omezení strojem pro jmenovité napětí generátoru a další omezovací křivky, odvozené v kapitole 6 a vycházející z parametrů, definovaných v kapitole 5.

Omezení statickou stabilitou (červené a oranžové křivky), jsou vytvořeny proložením příslušných pracovních bodů, uvedených v Tab. 7-3. V oblasti křivek statické stability 0 – 280 MW, je použita hodnota jalového výkonu, platná pro $P_g = 280$ MW. Jelikož provoz generátoru při takto malých výkonech je málo častým jevem a z důvodu velkého namáhání strojně-technologických částí sekundárního okruhu možný pouze krátkodobě, lze prohlásit přesnou znalost omezení statickou stabilitou v této oblasti za nedůležitou.

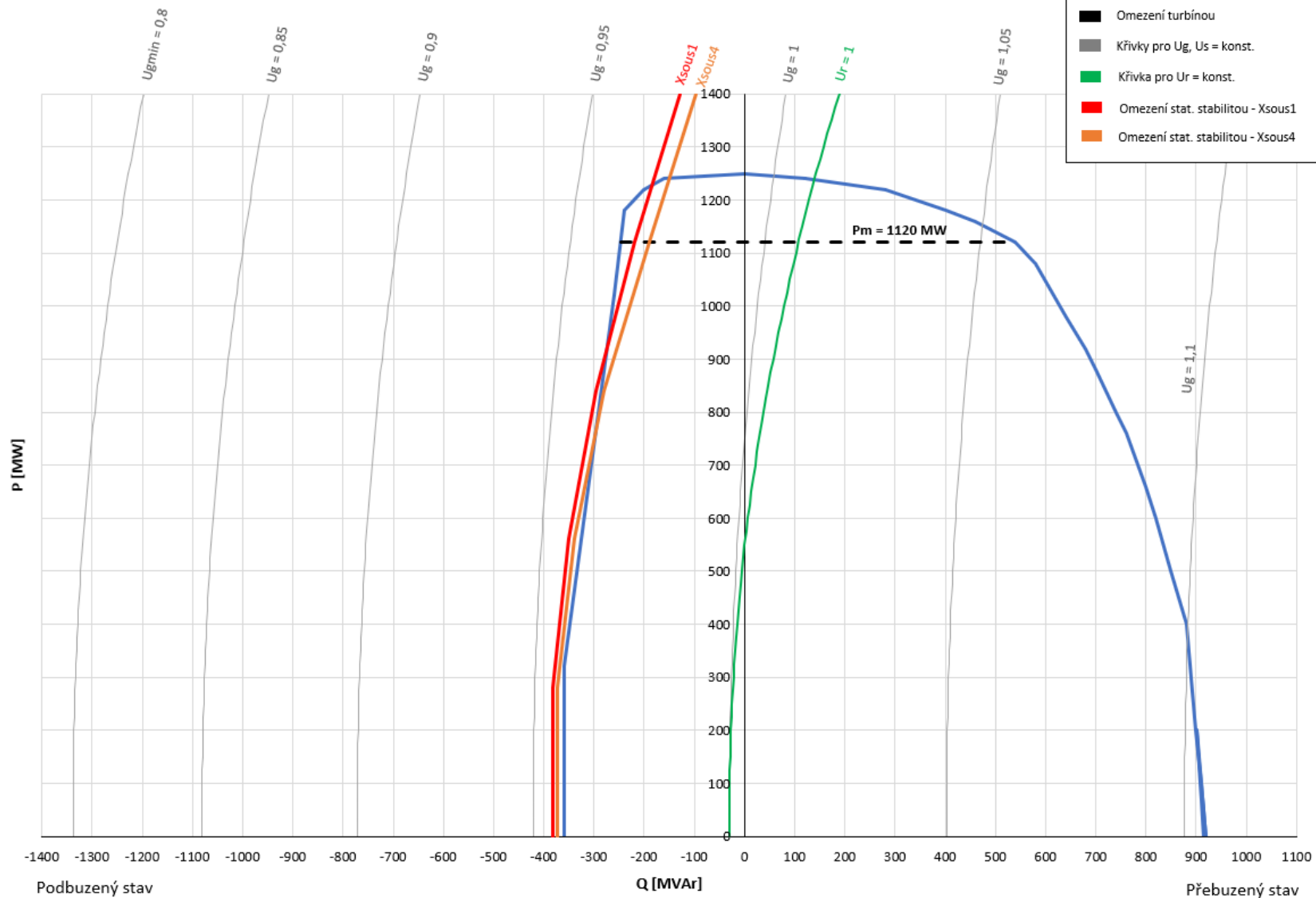
Křivku statické stability v oblasti činného výkonu 1120 – 1400 MW rovněž nebylo možné stanovit dynamickým výpočtem, protože výpočtový model neumožňuje simulovat provoz generátoru mimo stanovené meze. Z tohoto důvodu byli pracovní body křivky v této oblasti dopočítány lineární regresí přímkou, dané spojnicí pracovních bodů odpovídajících činnému výkonu 840 a 1120 MW. Průběh křivek v oblasti vyšších než jmenovitých činných výkonů generátoru slouží pouze pro potřeby snazšího porovnání s křivkami stanovenými fázorovou metodou v kapitole 6, provoz generátoru v této oblasti není možný z důvodu omezení mechanickým výkonem turbíny, viz kapitola 4.2.

Podrobný výpočet jednotlivých bodů křivek statické stability je uveden v [Příloha 2].

7.5.1 Diagram pro $U_s = 420$ kV

$S_n = 1250$ MVA $U_{gn} = 24$ kV $U_s = 420$ kV

PQ DIAGRAM GENERÁTORU ETE 1 - DYNAMICKÝ VÝPOČET

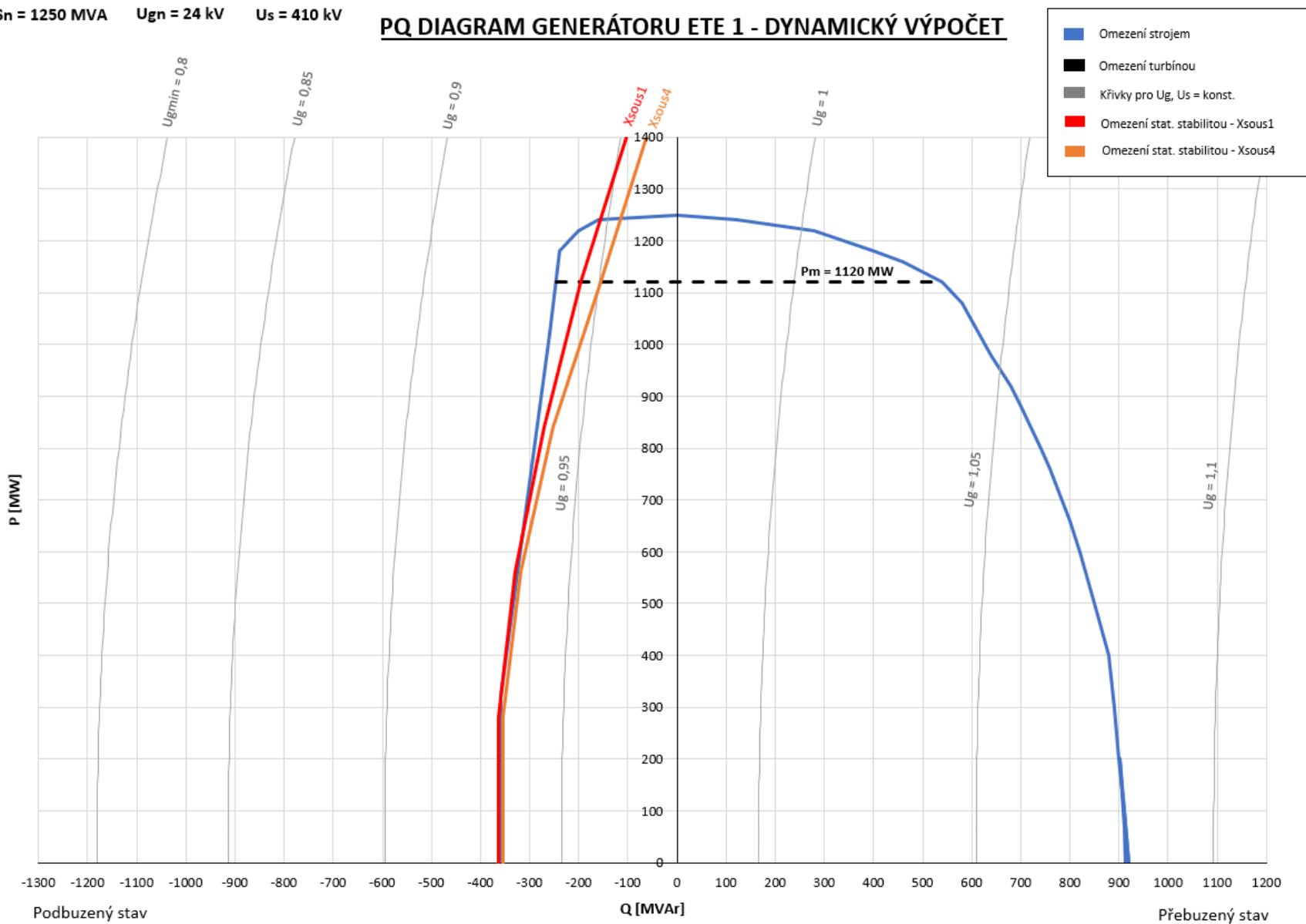


Obr. 7-9: PQ diagram - $U_s = 420$ kV

7.5.2 Diagram pro $U_s = 410$ kV

$S_n = 1250$ MVA $U_{gn} = 24$ kV $U_s = 410$ kV

PQ DIAGRAM GENERÁTORU ETE 1 - DYNAMICKÝ VÝPOČET

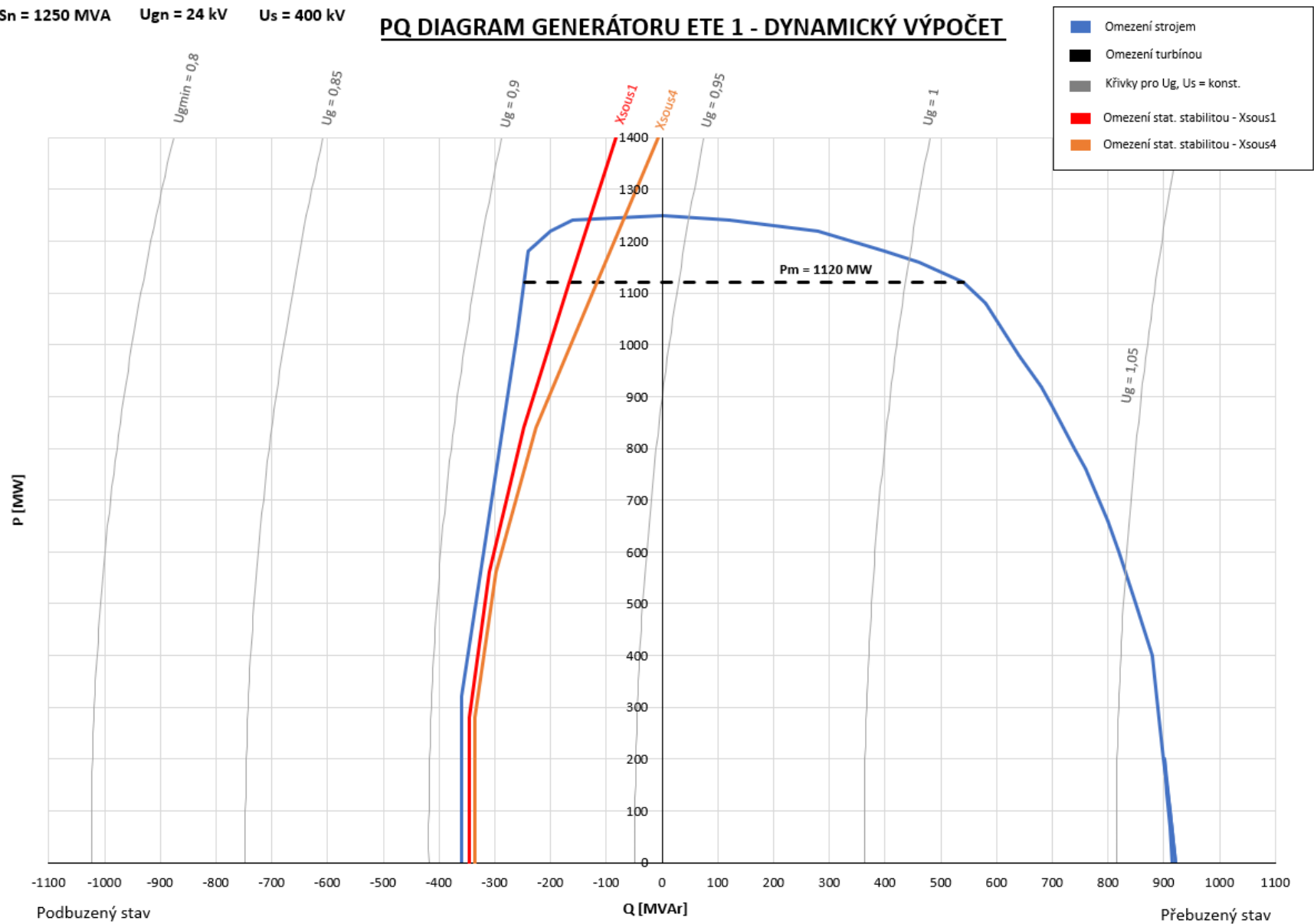


Obr. 7-10: PQ diagram - $U_s = 410$ kV

7.5.3 Diagram pro $U_s = 400$ kV

$S_n = 1250$ MVA $U_{gn} = 24$ kV $U_s = 400$ kV

PQ DIAGRAM GENERÁTORU ETE 1 - DYNAMICKÝ VÝPOČET



Obr. 7-11: PQ diagram - $U_s = 400$ kV

8. SROVNÁNÍ VÝPOČTOVÝCH METOD

V této kapitole jsou porovnány křivky omezení pracovní oblasti turbogenerátoru statickou stabilitou, spočtené fázorovou metodou v kapitole 6 a dynamickým výpočtem v kapitole 7, pro turbogenerátor 1. bloku jaderné elektrárny Temelín, jehož parametry jsou uvedeny v kapitole 5.

8.1 PQ diagramy – srovnání

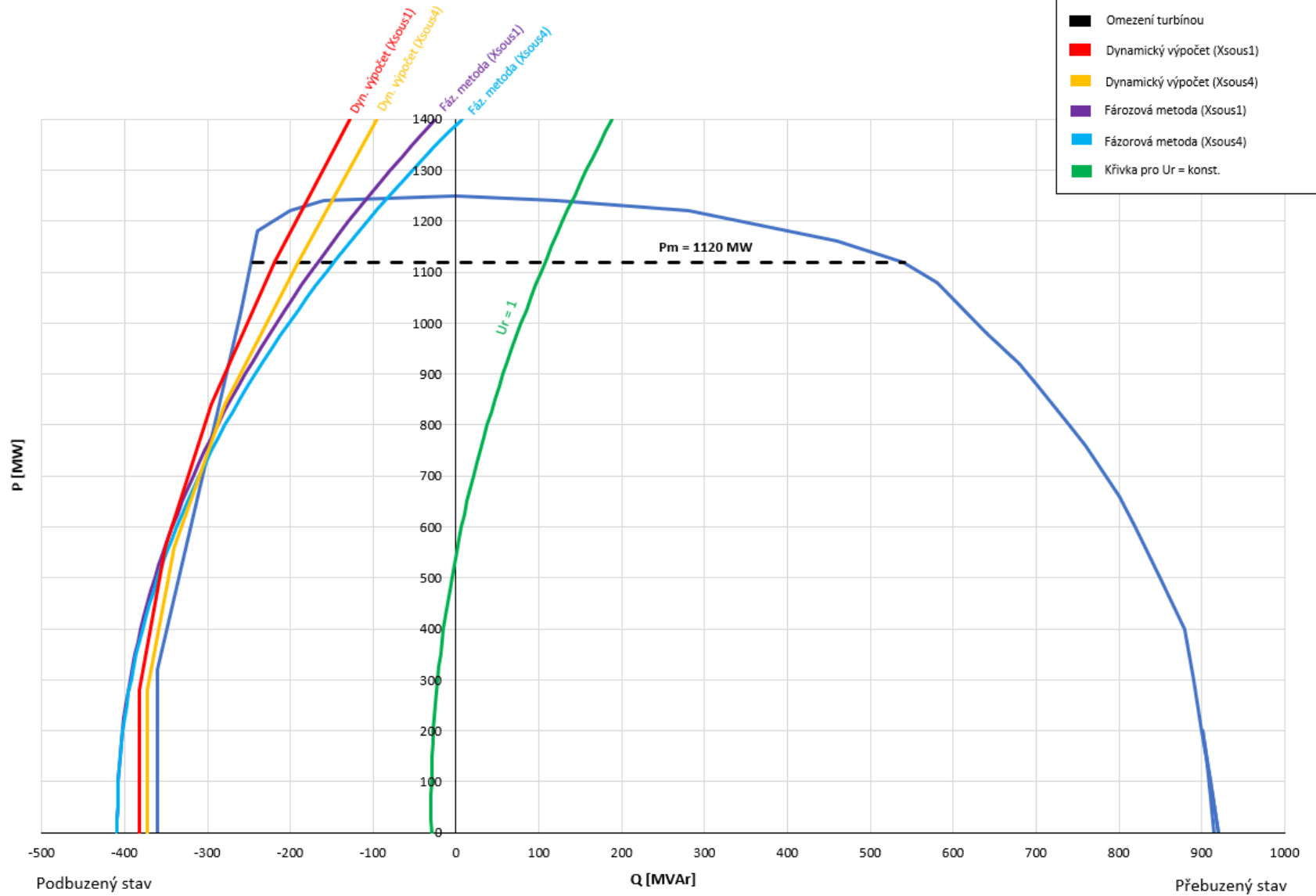
V kapitolách 8.1.1 až 8.1.3 jsou vyneseny PQ diagramy pro 3 úrovně napětí soustavy $U_s = 420, 410$ a 400 kV. V každém PQ diagramu jsou vyneseny křivky statické stability pro obě použité výpočetní metody, vždy pro 2 varianty topologie soustavy, definované v kapitole 5.6.

V diagramech jsou, kromě křivek statické stability, vyneseny omezující křivky dané schopnostmi generátoru (pro jmenovité napětí) a omezení dané maximálním mechanickým výkonem turbíny. Pro přehlednost nejsou vyneseny křivky, spojující pracovní body s konstantním napětím generátoru a křivky omezení minimálním napětím v rozvodu vlastní spotřeby. Pro $U_s = 420$ kV (Obr. 8-1) je vyneseno omezení maximálním napětím přenosové cesty vyvedení výkonu (zelená křivka), v dalších diagramech přesahuje rozsah grafu a neuplatní se.

8.1.1 Srovnávací diagram pro $U_s = 420 \text{ kV}$

$S_n = 1250 \text{ MVA}$ $U_{gn} = 24 \text{ kV}$ $U_s = 420 \text{ kV}$

PQ DIAGRAM - SROVNÁNÍ VÝPOČTOVÝCH METOD

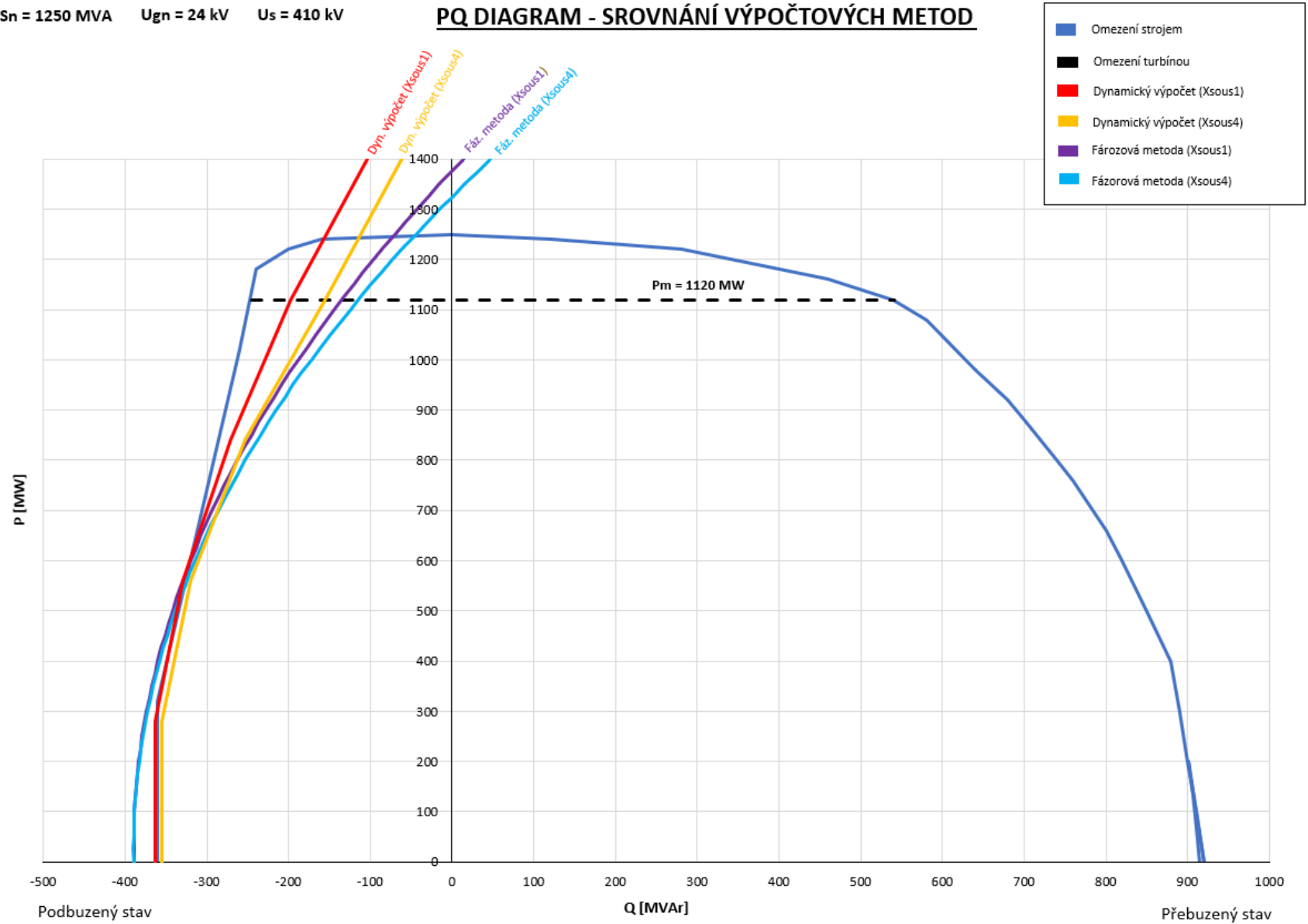


Obr. 8-1: Srovnávací PQ diagram - $U_s = 420 \text{ kV}$

8.1.2 Srovnávací diagram pro $U_s = 410 \text{ kV}$

$S_n = 1250 \text{ MVA}$ $U_{gn} = 24 \text{ kV}$ $U_s = 410 \text{ kV}$

PQ DIAGRAM - SROVNÁNÍ VÝPOČTOVÝCH METOD

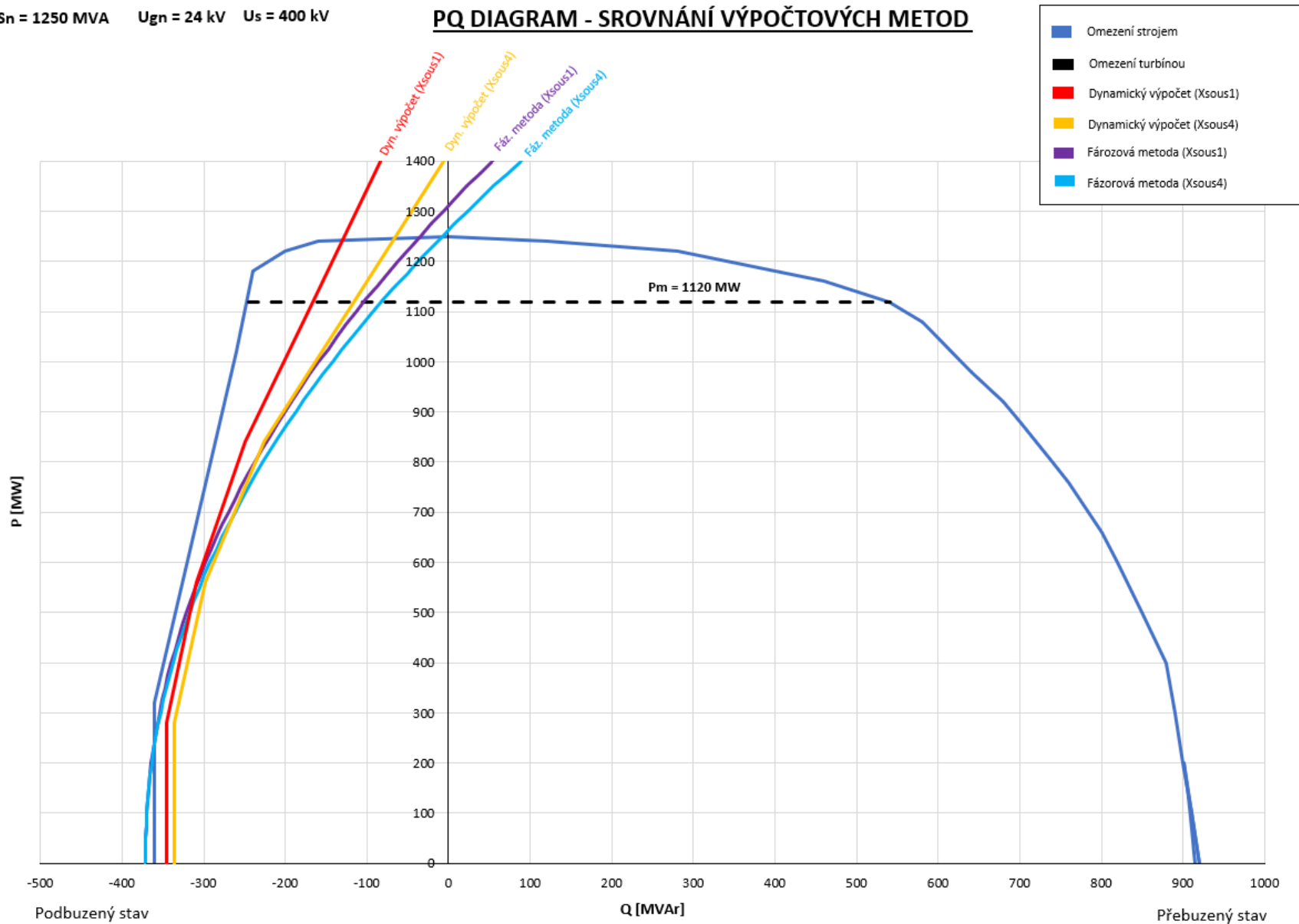


Obr. 8-2: Srovnávací PQ diagram - $U_s = 410 \text{ kV}$

8.1.3 Srovnávací diagram pro $U_s = 400 \text{ kV}$

$S_n = 1250 \text{ MVA}$ $U_{gn} = 24 \text{ kV}$ $U_s = 400 \text{ kV}$

PQ DIAGRAM - SROVNÁNÍ VÝPOČTOVÝCH METOD



Obr. 8-3: Srovnávací PQ diagram - $U_s = 400 \text{ kV}$

9. ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo porovnat vliv způsobu výpočtu na statickou stabilitu velkých turbogenerátorů. Porovnání bylo provedeno pro výpočet pomocí zjednodušené fázorové metody a pomocí dynamické simulace ve výpočetním programu NEPLAN. V první části práce je stručně popsán turbogenerátor, včetně náhradního schématu, používaného při výpočtech a simulacích, fázorového diagramu a budících souprav. Další část je věnována problematice statické stability. Je zde uvedena definice, odvození vztahů pro činný a jalový výkon přenášené přes reaktance do soustavy a vysvětlena výkonová charakteristika. Následně je obecně popsána pracovní oblast generátoru a jednotlivá omezení ovlivňující chod generátoru, především omezení statickou stabilitou. Dále jsou uvedeny parametry zařízení, vstupujících do výpočtů statické stability, prvního výrobního bloku jaderné elektrárny Temelín, který je, se zdánlivým výkonem 1 250 MVA, největším instalovaným zdrojem elektrické energie v ČR.

Pro potřeby výpočtu statické stability fázorovou metodou je odvozen vzorec, vycházející ze statického fázorového diagramu, zahrnující odběr vlastní spotřeby a pomyslnou reaktanci, reprezentující topologii přenosové soustavy. Statická stabilita je dále spočítána metodou dynamického výpočtu s použitím výpočtového programu NEPLAN na vytvořeném modelu přenosové soustavy ČR. Výsledné křivky statické stability, získané pomocí obou výpočtových metod, jsou vyneseny do PQ diagramů, včetně jejich porovnání.

Z výsledků výpočtu vyplývá, že fázorová metoda dává restriktivnější omezení statickou stabilitou, a především při nižších napětích soustavy značně snižuje možnost práce generátorů ETE v podbuzeném stavu. Dalším závěrem je, že čím nižší je počáteční napětí v soustavě, tím větší omezení statická stabilita představuje. Významný vliv na statickou stabilitu generátoru pracujícího s maximálním činným výkonem má rovněž topologie sítě (počet vazebních linek v rozvodně 400kV Kočín.) Při menším počtu provozovaných linek v rozvodně Kočín je soustava méně impedančně „tvrdá“ a tedy i schopnost generátoru udržet statickou stabilitu je menší.

Výsledky výpočtů statické stability jsou důležité pro stanovení pracovní oblasti stroje v podbuzeném stavu, potřebné pro nastavení hlídače meze podbuzení a ochrany při podbuzení generátoru. Křivka omezení daná schopnostmi generátoru v podbuzené oblasti je závislá na napětí generátoru. V závislosti na schopnostech generátoru tak může nastat stav, kdy bude teplotní omezení generátoru přísnější, než je omezení dané statickou stabilitou.

Omezení generátorů ETE statickou stabilitou je, u obou výpočtových metod, závislé na aktuálním stavu soustavy, ke které je stroj připojen. Pro co největší rozsah pracovní oblasti v podbuzeném stavu je proto vhodné používat systémy, umožňující za provozu dynamicky měnit své nastavení hlídače meze podbuzení v závislosti na situaci v soustavě. Moderní budící systémy již touto funkcí standardně disponují. Regulátory PRIMIS 186, instalované v ETE umožňují adaptivní změnu nastavení hlídače meze podbuzení v závislosti na aktuální hodnotě napětí v rozvodně Kočín a dalších parametrech.

Z výsledků této diplomové práce obecně vyplývá, že pro turbogenerátory velkých výkonů fázorová metoda výpočtu statické stability, vzhledem ke značným zjednodušením, dává příliš

velké omezení a proto je vhodnější využít pro stanovení křivky statické stability výpočet dynamickou simulací.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] ZIMA, Josef. *Elektrárny II*. 1. vyd. Praha: Ediční středisko Českého vysokého učení technického, 1984.
- [2] MÁSLA, Karel a kol., *Řízení a stabilita elektrizační soustavy*, ISBN 978-80-260-44671-1.
- [3] TROJÁNEK, Zdeněk, Josef HÁJEK a Pavol KVASNICA. *Přechodné jevy v elektrizačních soustavách*. 1. vyd. Praha: Nakladatelství techn. lit, 1987.
- [4] ONDRÁŠEK, Milan. *Elektrárny II*. 2. vyd. Praha: Nakladatelství techn. lit, 1985.
- [5] BRUSH SEM s.r.o., *Studie zvyšování výkonu generátorů*, TI0363, rev. E, 2012
- [6] IBLER, Zdeněk a Miloš BERAN. *Elektrárny II*. 1. vyd. Plzeň: Ediční středisko Vysoké školy strojní a elektrotechnické, 1983.
- [7] DOLEŽEL, Ivo. *Synchronní generátory a jejich příslušenství*. psaná forma přednášek předmětu Přenos a rozvod, Fakulta elektrotechnická ČVUT, verze z 18.10.2021
- [8] KOBRLA, Pavel, Jiří PAVELKA. *Elektrické pohony a jejich řízení*. 3. přepracované vyd. Praha: České vysoké učení technické, 2016. ISBN 8001060071.
- [9] VOŽENÍLEK, Petr et al. *Elektromechanické měniče*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické, 2005. ISBN 9788001031377;8001031373;.
- [10] P. Kundur et al. *Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions*, in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 19, no. 3. Aug. 2004. doi: 10.1109/TPWRS.2004.825981.
- [11] Český normalizační institut. ČSN EN 30068 (33 0120) Jmenovitá napětí CENELEC.
- [12] DOHNÁLEK, Petr. *Ochrany pro průmysl a energetiku*. 2. přepr. vyd. Praha: SNTL, 1991, ISBN 80-030-0630-9.
- [13] Český normalizační institut. ČSN 38 1120 Vlastní spotřeba tepelných elektráren a tepláren.
- [14] Energetický regulační úřad. *Roční zpráva o provozu elektrizační soustavy České republiky za rok 2020*.
- [15] TOMAN, Petr. *Provoz distribučních soustav*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 9788001049358;8001049353;.
- [16] ČEZ – Jaderná elektrárna Temelín. *Systémový provozní předpis OTS417: Automatická sekundární regulace napětí*. revize č. 6. 06/2020.
- [17] ČEZ – Jaderná elektrárna Temelín. *Systémový provozní předpis 1TS401: Generátor – vlastní zařízení včetně příslušenství*. revize č. 6. 04/2022.
- [18] ČEZ – Jaderná elektrárna Temelín. *Systémový provozní předpis OTS402: Transformátory – blokové, odbočkové, rezervní, trafa 110 kV ČSH, vzduchová trafa 6 kV všech výkonů*. revize č. 8. 11/2021.
- [19] ČEZ – Jaderná elektrárna Temelín. *Systémový provozní předpis OTS403: Vyvedení výkonu – generátorový vypínač, uzemňovač, vývodové vedení 400 kV, zapouzdřené vodiče*. revize č. 8. 06/2021.

- [20] ČEPS, a. s. *Parametry přenosové soustavy pro výpočet dynamické stability*, 05/2011
- [21] BRUSH SEM s.r.o., *Modely pro dynamické modelování chování regulátoru buzení generátoru 1250 MVA Temelín*, TI0551, rev. A, 08/2011
- [22] BRUSH SEM s.r.o., *Modernizace budící soupravy JE Temelín*, Eg 407326 P/b, rev. B, 02/2012
- [23] IEEE Std. 421.5-2016 (Revision of IEEE Std 421.5-2005). *Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies*. 08/2016
- [24] DŽMURA, Jaroslav. *Úvod do stability prenosu elektrickej energie*. Vyd. 1. Košice: Technická univerzita v Košiciach, 2012. ISBN 978-80-553-1184-5.
- [25] Ilic I., Alfredo Viskovic and Mario Vrazic. *User P-Q diagram as a tool in reactive power trade*. 2011 8th International Conference on the European Energy Market (EEM).

SEZNAM PŘÍLOH

[Příloha 1] PRILOHA1_Fazorova_metoda.xlsm

- Příloha 1 obsahuje výpočet křivek omezení dle odvozených vztahů a sestavené PQ diagramy pro fázorovou metodu.

[Příloha 2] PRILOHA2_Dynamicky_vypocet.xlsx

- Příloha 2 obsahuje grafy průběhů veličin a tabulku výsledných hodnot, vyexportovaných z programu NEPLAN a sestavené PQ diagramy pro dynamický výpočet.

[Příloha 3] PRILOHA3_Srovnani_metod.xlsx

- Přílohu 3 tvoří PQ diagramy srovnávající křivky statické stability pro použité metody výpočtu.

[Příloha 4] PRILOHA4_Neplan_model.nep360

- Příloha 4 je soubor modelu přenosové soustavy pro dynamický výpočet.