

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE



FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

**VÝPOČTY PŘECHODOVÝCH DĚJŮ VE
VLASTNÍ SPOTŘEBĚ JADERNÉ ELEKTRÁRNY**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

KVĚTEN 2023

BC. PROKOP ŠEVČÍK

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Ševčík** Jméno: **Prokop** Osobní číslo: **474003**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektroenergetiky**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Specializace: **Elektroenergetika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Výpočty přechodových dějů ve vlastní spotřebě jaderné elektrárny

Název diplomové práce anglicky:

Transient analysis of auxiliary system in nuclear power plant

Pokyny pro vypracování:

- 1) Výpočet ustáleného chodu před přechodovým dějem
- 2) Metodika výpočtu přechodových dějů při spouštění pohonů a samonajíždění ve VS
- 3) Provedení orientačního ručního výpočtu poklesu napětí při spouštění největšího spotřebiče a při záskoku rozvodny na rezervní napájení
- 4) Provedení podrobného výpočtu průběhu příslušných fyzikálních veličin pomocí simulačního programu NEPLAN
- 5) Porovnání podrobného výpočtu s výsledky ručního výpočtu, zhodnocení a shrnutí

Seznam doporučené literatury:

- 1) TROJÁNEK, Zdeněk, Josef HÁJEK a Pavol KVASNICA. Přechodné jevy v elektrizačních soustavách. Praha: SNTL, 1987.
- 2) ONDRÁŠEK, Milan. Elektrárny II. 2. vydání. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1988.
- 3) ČSN 38 1120: Vlastní spotřeba tepelných elektráren a tepláren. 1994.

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: **03.02.2023**

Termín odevzdání diplomové práce: **26.05.2023**

Platnost zadání diplomové práce: **22.09.2024**

Ing. Pavel Fajgl
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Zdeněk Müller, Ph.D.
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

Děkuji Ing. Pavlu Fajglovi za odborné vedení práce, připomínky a zaškolení v prostředí software *NEPLAN*.

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 22. května 2023

.....

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá výpočty napěťových poměrů při přechodových stavech ve vlastní spotřebě jaderné elektrárny. Je kontrolován pokles napětí při spouštění největšího spotřebiče a samonajíždění skupiny pohonů. Výpočet je nejprve proveden jako orientační, zjednodušený. Při tomto výpočtu je vlastní spotřeba elektrárny modelována jako uzlována elektrická síť, kde jednotlivé zařízení jsou nahrazeny impedancemi. Posléze je proveden podrobný výpočet v simulačním software *NEPLAN*. Jsou porovnány a vyhodnoceny výsledky obou výpočtů.

Klíčová slova: vlastní spotřeba jaderné elektrárny, přechodový stav, ustálený stav, load flow, spouštění největšího spotřebiče, samonajíždění

ABSTRACT

The diploma thesis focuses on transient analysis of nuclear power plant auxiliary system. Voltage drops during start of the biggest motor and start of motors are examined. Analysis is first done as simplified calculation. The auxiliary power system is modelled as noded power grid. Elements of the auxiliary power system are replaced by impedances. Detailed analysis is done in simulation software *NEPLAN*. Simplified and detailed analysis are evaluated and compared.

Keywords: nuclear power plant auxiliary system, transient state, steady state, load flow, start of the biggest motor, start of motors

OBSAH

ÚVOD	11
KAPITOLA 1: VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU PŘED PŘECHODOVÝM JEVEM	12
1.1 LOAD FLOW – VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU	12
1.1.1 Obecná definice load flow	12
1.1.2 Gaussova-Seidelova metoda numerického výpočtu	13
1.1.3 Newton-Raphsonova metoda numerického výpočtu	14
1.1.4 Fast decoupled load flow (FDLF) metoda numerického výpočtu.....	16
1.1.5 Porovnání jednotlivých metod	16
KAPITOLA 2: PŘECHODOVÉ PROCESY VE VLASTNÍ SPOTŘEBĚ JADERNÉ ELEKTRÁRNY	18
2.1 VLASTNÍ SPOTŘEBA JADERNÉ ELEKTRÁRNY	18
2.2 POHONY VE VS, SPOUŠTĚNÍ SPOTŘEBIČE A SAMONAJÍŽDĚNÍ	20
2.2.1 Spouštění největšího spotřebiče.....	22
2.2.2 Samonajíždění pohonů VS.....	24
2.3 PŘECHOD NAPÁJENÍ VS NA REZERVNÍ ZDROJ	26
2.3.1 Paralelní přechod	27
2.3.2 Rychlý přechod.....	27
2.3.3 Přechod ve fázi.....	28
2.3.4 Přechod na základě podpětí	28
2.3.5 Přechod v nastaveném čase.....	28
KAPITOLA 3: DEFINICE VÝPOČETNÍHO MODELU	29
3.1 TURBOGENERÁTOR	29
3.2 BLOKOVÝ TRANSFORMÁTOR	29
3.3 ODBOČKOVÝ TRANSFORMÁTOR	30
3.4 REZERVNÍ TRANSFORMÁTOR	30
3.5 TRANSFORMÁTOR VS	30
3.6 SOUSTAVA	31
3.7 VEDENÍ	31
3.8 KABELY	32
3.9 POHONY VS	32

KAPITOLA 4: ZJEDNODUŠENÝ ORIENTAČNÍ VÝPOČET PŘECHODOVÝCH STAVŮ VE VLASTNÍ SPOTŘEBĚ JADERNÉ ELEKTRÁRNY.....	34
4.1 SPOUŠTĚNÍ NEJVĚTŠÍHO SPOTŘEBIČE.....	34
4.1.1 Výpočetní kontrola poklesu napětí na přípojnici rozvodného zařízení VS při spouštění největšího spotřebiče.....	35
4.1.2 Vyhodnocení orientačního výpočtu poklesu napětí na přípojnici rozvodného zařízení VS rozvodu BB při spouštění největšího spotřebiče	38
4.2 SAMONAJÍZDĚNÍ SKUPINY POHONŮ	38
4.2.1 Výpočetní kontrola poklesu napětí na svorkách spotřebičů VS při samonajíždění 39	
4.2.2 Vyhodnocení orientačního výpočtu při samonajíždění skupiny pohonů	42
KAPITOLA 5: PODROBNÝ VÝPOČET POMOCÍ SIMULAČNÍHO PROGRAMU NEPLAN	43
5.1 SPOUŠTĚNÍ NEJVĚTŠÍHO SPOTŘEBIČE.....	43
5.1.1 Vyhodnocení simulace spouštění největšího spotřebiče.....	44
5.2 SIMULACE SAMONAJÍZDĚNÍ SKUPINY POHONŮ.....	44
5.2.1 Vyhodnocení simulace samonajíždění skupiny pohonů.....	47
ZÁVĚR.....	49
LITERATURA.....	51
PŘÍLOHA A: SEZNAM ZKRATEK.....	52
PŘÍLOHA B: ELEKTRICKÉ SCHÉMA ZKOUMANÉ JADERNÉ ELEKTRÁRNY	53

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1.1: Modelové pětiuzlové schéma studie load flow s vyobrazenými uzly jednotlivých typů [3].	13
Obrázek 2.1: Schéma napájení VS přes odbočkový transformátor připojeným do odbočky na vyvedení výkonu generátoru [10].	19
Obrázek 2.2: Principiální schéma řešení rezervního napájení VS pomocí připojení na síťovou rozvodnu 110 kV přes rezervní transformátor.	20
Obrázek 2.3: Momentové charakteristiky motoru a poháněného zařízení [12].	21
Obrázek 2.4: Elektrické a výpočetní schéma ilustrující spouštění největšího spotřebiče ve VS.	23
Obrázek 2.5: Elektrické a výpočetní schéma ilustrující samonajíždění pohonů ve VS.	26
Obrázek 2.6: Graf zón jednotlivých přechodů se ztrátou napájení s odpovídajícími fázovými posuny a velikostmi napětí [16].	27
Obrázek 4.1: Schéma vykreslující kontrolovanou situaci při spouštění největšího spotřebiče.	34
Obrázek 4.2: Výpočtové schéma spouštění největšího spotřebiče ...	36
Obrázek 4.3: Schéma samonajíždění skupiny pohonů napájených přes RT.	39
Obrázek 4.4: Výpočetní schéma samonajíždění přes RT.	40

SEZNAM TABULEK

Tabulka 3-1: Parametry turbogenerátoru.	29
Tabulka 3-2: Parametry blokového transformátoru.	30
Tabulka 3-3: Parametry odbočkového transformátoru.	30
Tabulka 3-4: Parametry rezervního transformátoru.	30
Tabulka 3-5: Parametry transformátoru VS.	31
Tabulka 3-6: Parametry soustavy 400 kV.	31
Tabulka 3-7: Parametry soustavy 110 kV.	31
Tabulka 3-8: Parametry vedení soustava 400 kV-BT.	31
Tabulka 3-9: Parametry vedení soustava 110 kV-RT.	31
Tabulka 3-10: Přívodní kabel elektromotorů 6-AKYCY 3x185.	32
Tabulka 3-11: Typické délky přívodních kabelů motorů jednotlivých pohonů.	32
Tabulka 3-12: Seznam pohonů VS napájených z rozvodu 6 kV včetně jejich parametrů.	32
Tabulka 3-13: Seznam pohonů VS napájených z rozvodu 0,4 kV včetně jejich parametrů.	33
Tabulka 4-1: Parametry pohonů napájených z rozvodu BB nutné pro výpočet poklesu napětí při spouštění největšího spotřebiče.	35
Tabulka 4-2: Parametry nn pohonů napájených z rozvodu BB přes transformátor VS nutné pro výpočet poklesu napětí při spouštění největšího spotřebiče.	35
Tabulka 4-3: Parametry vn pohonů účastnících se samonajíždění na rozvodech BD a BA potřebné pro výpočet reaktance samonajíždění s definovaným stavem zapnuto/vypnuto.	41

Obrázek 5.1: Průběh poměrného napětí na rozvodně 6 kV BB a na svorkách elektromotoru při spouštění největšího spotřebiče ...	43	Tabulka 4-4: Parametry nn pohonů účastnících se samonajždění na rozvodech BD a BA potřebné pro výpočet reaktance samonajždění	41
Obrázek 5.2: Průběh poměrného napětí na svorkách ostatních motorů s největším výkonem HCC, LAC a motoru s nejdelším přívodním kabelem PKJ	44		
Obrázek 5.3: Průběh napětí na svorkách motoru s nejdelším přívodním kabelem CCHV připojeného na rozvodně BD při samonajždění skupiny pohonů	45		
Obrázek 5.4: Průběh skluzu v čase největšího motoru CCHV připojeného na rozvodně BD při samonajždění skupiny pohonů	46		
Obrázek 5.5: Průběh napětí na svorkách motorů HCC a LAC připojených na rozvodně BD při samonajždění skupiny pohonů	46		
Obrázek 5.6: Průběh skluzu motorů HCC a LAC připojených na rozvodně BD při samonajždění skupiny pohonů	47		
Obrázek 5.7: Průběh poměrného napětí na rozvodnách VS 6 kV BA, BB, BC a BD při samonajždění skupiny pohonů	47		

ÚVOD

Vlastní spotřeba jaderné elektrárny jakožto soubor elektrických spotřebičů potřebných pro fungování výrobních zařízení elektrárny je specifická tím, že v sobě integruje zařízení zajišťující jadernou bezpečnost.

Vyhláška atomového zákona č. 329/2017 klade na systémy s vlivem na jadernou bezpečnost, určené projektem jaderného zařízení, podmínky na zajištění napájení. K dispozici musí být pracovní zdroj napájení vlastní spotřeby, který představuje vlastní generátor elektrárny či elektrická síť 400 kV, do níž je vyváděn výkon, a rezervní zdroj napájení vlastní spotřeby, kterým je elektrická síť 110 kV. Dále musí být zajištěny nouzové autonomní zdroje umístěné na území elektrárny — diesel-generátor a akumulátorové baterie.

V projektu elektrické části elektrárny musí být rovněž aplikován princip ochrany do hloubky, který spočívá v postupném a řízeném přechodu z pracovního zdroje napájení na rezervní zdroj napájení a případně pak na nouzové zdroje.

Při přechodu napájení vlastní spotřeby z pracovního zdroje na rezervní dochází ke vzniku přechodových procesů, které je důležité analyzovat a vyhodnocovat. Při přechodových procesech ve VS může dojít k takovému poklesu napětí na zařízeních VS, který znemožní rozběh všech nebo několika pohonů.

Diplomová práce se zabývá výpočty napěťových poměrů ve vlastní spotřebě jaderné elektrárny při přechodových procesech, který jsou způsobeny spouštěním největšího spotřebiče nebo přechodem z pracovního zdroje napájení na rezervní, při němž dochází k samonajíždění příslušné skupiny pohonů. Napěťové poměry jsou vyhodnocovány dle podmínek na elektrickou část vlastní spotřeby elektráren, které stanovuje norma ČSN 38 1120: Vlastní spotřeba tepelných elektráren a tepláren.

Zkoumaná jaderná elektrárna je fiktivní. Přechodové procesy jsou zkoumány na jednom elektrárenském bloku o dvou turbogenerátorech, detailní popis parametrů jednotlivých prvků myšlené elektrárny je uveden v Kapitola 3:.

Výpočet je nejprve proveden jako zjednodušený, orientační, v jehož rámci jsou jednotlivé prvky sítě vlastní spotřeby nahrazeny impedancemi. Následně je proveden detailní výpočet průběhů sledovaných veličin při přechodových procesech v prostředí software *NEPLAN V556*.

KAPITOLA 1: VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU PŘED PŘECHODOVÝM JEVEM

Obecným ustáleným stavem se myslí stav systému, při kterém se nemění stavové veličiny systému – soubor vnitřních veličin vyjadřujících prehistorický vývoj systému, který má přímý vliv na chování systému v sledovaném okamžiku. Přechodový jev pak lze definovat jako fyzikální proces probíhající v čase ve zkoumaném systému, který probíhá mezi dvěma ustálenými stavy.

Z hlediska elektroenergetiky představuje zkoumaný dynamický systém elektrická síť, kterou může být např. celková elektrizační soustava, přenosová či distribuční soustava nebo systém vlastní spotřeby elektrárny. Ustáleným chodem se pak rozumí rovnovážný stav systému, při kterém se stavové veličiny v elektrické síti neměnní. Pokud se uvažuje střídavá elektrická síť, tak se při ustáleném chodu sice stavové veličiny proudu a napětí fakticky mění harmonicky v čase s konstantní amplitudou, ale fyzikální procesy ve střídavé síti jsou neměnné, např. efektivní hodnoty I a U či střední moment na hřídeli [1].

Diplomová práce se zabývá výpočty přechodových jevů ve vlastní spotřebě (VS) jaderné elektrárny, proto se jako zkoumaný systém uvažuje právě systém vlastní spotřeby elektrárny zahrnující napájecí zdroje VS, elektrické pohony, transformátory a propojovací kabely.

1.1 Load flow – Výpočet ustáleného chodu

Pro stanovení ustáleného chodu zkoumané soustavy se užívá numerického výpočetního algoritmu, jehož výsledkem je tzv. load flow, někdy též označované jako power flow. Elektrická síť se v rámci výpočtu load flow zjednodušeně simuluje jako soubor uzlů a větví. Výstupem výpočtu, tedy load flow, jsou amplitudy a fázové posuny fázorů napětí v každém uzlu (př. zdroj, zátěž) a fázory činného a jalového výkonu na každé větvi (př. vedení, reaktor).

V této kapitole je následně popsána obecná analytická definice load flow studie. Dále jsou stručně představeny jednotlivé metody pro řešení load flow studie. Jelikož se vždy jedná o numerickou aproximaci, tak jsou probrány i jejich výhody a nevýhody.

1.1.1 Obecná definice load flow

Základem pro definování load flow studie je sestavení zjednodušeného modelového schématu zkoumané elektrické soustavy, v němž jsou zaznamenány pouze jednotlivé uzly a větve (příklad je uveden na Obrázek 1.1). Větve reprezentující topologii sítě jsou popsány pomocí π -článku. Jednotlivé admitance jsou pak zaznamenány v admitanční matici o rozměru $N \times N$, kde N značí celkový počet uzlů. Uzly jsou určeny fázorem napětí U , fázovým úhlem δ , činným výkonem P a jalovým výkonem Q . Vzájemný vztah těchto veličin v daném uzlu i , do něhož vstupují činný a jalový výkon lze vyjádřit rovnicí [2]:

$$\hat{P}_i - j\hat{Q}_i = \hat{U}_i^* \sum_{n=1}^N \hat{Y}_{in} \hat{U}_n, \quad (1-1)$$

kde \hat{P}_i značí fázor činného výkonu vstupujícího do uzlu i , \hat{Q}_i fázor jalového výkonu vstupujícího do uzlu i , \hat{U}_i^* fázor komplexně sdruženého napětí v i -tém uzlu, \hat{Y}_{in} fázor admittance na vedení mezi i -tým a n -tým uzlem a \hat{U}_n fázor napětí v n -tém uzlu.

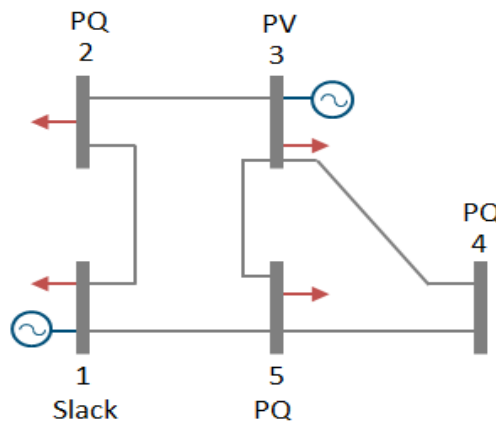
Pokud se vyjádří velikosti fázorů a fázové posuny tak se získá:

$$\hat{P}_i - j\hat{Q}_i = \sum_{n=1}^N |Y_{in} U_i U_n| \cdot e^{j(\theta_{in} - \delta_n - \delta_i)}, \quad (1-2)$$

kde θ_{in} značí fázový posun na vedení mezi uzly i a n , δ_i fázový úhel napětí v uzle i a δ_n fázový úhel napětí v n -tém uzlu.

Na základě toho, jaké 2 veličiny z těchto 4 základních uzlových veličin jsou známé a jaké 2 veličiny jsou dopočítány, se uzly rozdělují do 3 základních kategorií:

1. **Slack uzel** – Znamé jsou veličiny U a δ , slouží pro referenci fázových posuvů dalších uzlů.
 2. **PQ uzel** – Znamé jsou P a Q , jedná se o odběrný uzel nebo uzel s generátorem, kde nedochází k regulaci P či U .
 3. **PU uzel** – Znamé jsou P a U , uzel zpravidla představuje regulovatelný generátor
- Příklad schématu tvořícího podklad pro load flow studii je uveden na Obrázku 1-2 [3].



Obrázek 1.1: Modelové pětiuzlové schéma studie load flow s vyobrazenými uzly jednotlivých typů [3].

1.1.2 Gaussova-Seidelova metoda numerického výpočtu

Gaussova-Seidelova metoda je postup výpočtu, při kterém se postupně odhadují výsledky jednotlivých nelineárních rovnic (1-1), (1-2) reprezentujících uzly zkoumané sítě v dílčích iteracích. V prvotní iteraci je přiřazena odhadovaná hodnota napětí pro uzly, kde hodnota napětí není známá (PQ uzel), a následně je v těchto uzlech vypočítána nová

hodnota napětí z odhadnutých hodnot napětí a specifikovaných hodnot P a Q v následujících iteracích. Takto se iteruje, dokud není ve všech uzlech rozdíl napětí ve dvou po sobě následujících iteracích menší jak určitá minimální hodnota ε [2].

Výchozí zadanou hodnotu napětí představuje slack bus, který má za tímto účelem přiřazen ve schématu a výpočtu index 1 a dále se nepřepočítává. Napětí pro PQ uzly s neznámým napětím, indexovaných $i = 2$ až N , je vypočítáno dle analytického vztahu vycházejícího z (1-2):

$$U_i = \frac{1}{Y_{ii}} \left[\frac{P_i - jQ_i}{U_i^*} - \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq i}}^N Y_{in} U_n \right]. \quad (1-3)$$

Pro PV uzly, u nichž je hodnota amplitudy napětí známá, jsou v jednotlivých iteracích vypočítány hodnoty Q a δ dle výchozí rovnice veličin uzlu (1-2) podle vztahu:

$$Q_i = -Im \left\{ U_i^* \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq i}}^N Y_{in} U_n \right\}. \quad (1-4)$$

Úhel δ se vypočítá po určení i -tého napětí jako jeho argument:

$$\delta_i = Arg \left[\frac{P_i - jQ_i}{U_i^*} - \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq i}}^N Y_{in} U_n \right]. \quad (1-5)$$

1.1.3 Newton-Raphsonova metoda numerického výpočtu

Základem Newton-Raphsonovy metody je Taylorův rozvoj funkce více proměnných. Obecně lze Newton-Raphsonovu metodu zapsat pomocí $i = 1$ až n nelineárních rovnic o n neznámých, kde řešení jednotlivých rovnic představuje konstanta c_i :

$$f_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = c_i; \quad i = 1 \text{ až } n. \quad (1-6)$$

Kde se pro každou neznámou odhadne prvotní řešení výsledku jako x_1^0 až x_n^0 . Hodnoty Δx_1^0 až Δx_n^0 pak představují korekce, které se přičítají k prvotním odhadovaným hodnotám proměnných a společně tak dávají výsledné neznámé pro řešení soustav rovnic:

$$f_i(x_1^0 + \Delta x_1^0, x_2^0 + \Delta x_2^0, \dots, x_n^0 + \Delta x_n^0) = c_i; \quad i = 1 \text{ až } n. \quad (1-7)$$

Rozvine-li se takto definovaná soustava pomocí Taylorovy řady v okolí prvotních odhadů a výsledek se zapíše pomocí vektoru prvotních odhadovaných neznámých \vec{f}_0 a jacobianu J představujícím čtvercovou matici parciálních derivací jednotlivých rovnic podle neznámých x_1 až x_n :

$$\vec{f}_0 + J\overline{\Delta x^0} = 0, \quad (1-8)$$

$$J\overline{\Delta x^0} = -\vec{f}_0. \quad (1-9)$$

Rovnice $f_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = c_i$ reprezentované vektorem \vec{f}_0 se vypočítají na základě odhadovaných hodnot. Zavedou se nové tzv. neshodné rovnice Δf_1^0 až Δf_n^0 jakožto rozdíl zadaného výsledku f_i a vypočítaného výsledku f_i na základě odhadovaných hodnot. Následným řešením těchto neshodných rovnic, zpravidla pomocí triangulace, se získají hodnoty korekcí Δx_1^0 až Δx_n^0 a vypočítají se nové hodnoty neznámých x_1^1 až x_n^1 [2]:

$$\overline{\Delta x^0} = [J]^{-1}[-\vec{f}_0], \quad (1-10)$$

$$x^1 = x^0 + \Delta x^0. \quad (1-11)$$

Takto se proces opakuje, dokud absolutní hodnota korekcí v k -té iteraci Δx_1^k až Δx_n^k není menší než určitá minimální hodnota ε , obdobně jako v případě Gauss-Seidelovy metody popsané v Kapitole 1.1.2.

Při řešení load flow problému takto definovanou metodou pro každý PQ uzel odpovídají neznámé hodnoty $|\widehat{U}_i|$ a δ_i odhadovaným hodnotám x_1^0 až x_n^0 , známé hodnoty P a Q odpovídají řešení rovnice c_i z (1-7), neshodné rovnice pak představuje rozdíl známých hodnot P a Q a vypočítaných hodnot P a Q , tzv. defekty výkonů ΔP_i a ΔQ_i (odpovídající vektoru \vec{f}_0):

$$\Delta P_i = P_{iZADANÉ} - P_{iVYPOČITANÉ}, \quad (1-12)$$

$$\Delta Q_i = Q_{iZADANÉ} - Q_{iVYPOČITANÉ}. \quad (1-13)$$

Vektor korekcí $\overline{\Delta x^0}$ pak v load flow představuje hodnoty $\Delta|\widehat{U}_i|$ a $\Delta\delta_i$, jacobíán J tvoří matici parciálních derivací P_i a Q_i dle neznámých hodnot $|\widehat{U}_i|$ a δ_i pro každý i -tý uzel. Pro i -tý PQ uzel tedy element jacobíánu představuje matici 2x2:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} & \frac{\partial P_i}{\partial |\widehat{U}_i|} \\ \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} & \frac{\partial Q_i}{\partial |\widehat{U}_i|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_i \\ \Delta |\widehat{U}_i| \end{bmatrix}. \quad (1-14)$$

Slack busu, jenž má hodnoty $|\widehat{U}_i|$ a δ_i zafixované a hodnoty P_i a Q_i neurčené, náleží nulový element a do jacobíánu nevstupuje. V případě PV uzlu je známý pouze činný výkon P , element jacobíánu je tedy řádkový vektor [5].

Jakmile jsou takto definovány všechny prvky rovnice (1-10) potřebné pro Newton-Raphsonovu numerickou metodu, je možné přejít k iterativnímu algoritmu pro získání řešení load flow, který probíhá následovně:

1. Odhad hodnot $|\widehat{U}_i|$ a δ_i pro každý i -tý PQ uzel, odhad δ_i pro každý i -tý PU uzel v počáteční iteraci $k = 0$
2. Výpočet P_i a Q_i na základě odhadnutých hodnot z 1. kroku v k -té iteraci
3. Výpočet defektů výkonů ΔP_i a ΔQ_i v k -té iteraci
4. Sestavení jacobíánu a inverzní matice jacobíánu
5. Výpočet korekcí $\Delta|\widehat{U}_i|$ a $\Delta\delta_i$ v k -té iteraci na základě (1-11):

$$\begin{bmatrix} \Delta\delta_i \\ \Delta|\widehat{U}_i| \end{bmatrix} = \mathbf{J}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} \quad (1-15)$$

6. Přepočtení hodnot $|\widehat{U}_i|$ a δ_i pomocí vypočítaných hodnot $\Delta|\widehat{U}_i|$ a $\Delta\delta_i$ z předchozího kroku pro $k+1$ iteraci:

$$|\widehat{U}_i|^{k+1} = |\widehat{U}_i|^k + \Delta|\widehat{U}_i|^k \quad (1-16)$$

7. Algoritmus se opakuje od kroku č. 2, dokud velikost k -tých korekcí $\Delta|\widehat{U}_i|$ a $\Delta\delta_i$ ve všech uzlech není menší jak požadovaná minimální hodnota ε .

1.1.4 Fast decoupled load flow (FDLF) metoda numerického výpočtu

Jedná se o modifikaci Newton-Raphsonovy metody popsané v předešlé kapitole. Funguje na základě poznatku, že vlivem podélných reaktancí X , tedy velkých poměrů X/R , se zanedbávají vlivy P na $|\widehat{U}|$ a Q na δ . Při sestavování jacobíánu se tak tyto prvky pro PQ uzel zanedbají a v elementu jacobíánu se nahradí nulou:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} & 0 \\ 0 & \frac{\partial Q_i}{\partial |\widehat{U}_i|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta_i \\ \Delta|\widehat{U}_i| \end{bmatrix} \quad (1-17)$$

Hlavní výhodou oproti klasické metodě Newton-Raphson jsou menší nároky na paměť počítače při ukládání takto redukováného jacobíánu [6].

1.1.5 Porovnání jednotlivých metod

Výhodou Gauss-Seidelovy metody je jednoduchost výpočetního algoritmu, který na rozdíl od Newton-Raphsonovy a FDLF metody neutilizuje matic a jednotlivé iterace tak mají kratší výpočetní čas, další předností je její malá náročnost na paměť. Nevýhodou je velký počet iterací potřebných pro nalezení konvergentního řešení. S rostoucí velikostí zkoumaného systému (přibývá počet uzlů) v load flow studii se výpočetní čas zvyšuje vlivem více potřebných iterací.

V případě Newton-Raphsonovy metody je sice výpočetní čas potřebný pro jednu iteraci delší než při Gauss-Seidelově metodě, ale celkový výpočetní čas numerické metody je kratší vlivem menšího počtu potřebných iterací. Zejména pokud je počáteční odhad blízko řešení. K zrychlení konvergence je možné vypočítat první iteraci pomocí Gauss-Seidelovy metody a získané hodnoty pak použít jako výchozí pro Newton-Raphsonovu metodu [5].

Ze všech popsaných metod navíc Newton-Raphsonova konverguje nejlépe [7]. Hlavní nevýhodou je její velká náročnost na paměť počítače vlivem algoritmu užívajícího maticový počet.

Jak již bylo uvedeno v Kapitole 1.1.4 tak paměťovou náročnost snižuje modifikovaná FDLF metoda, zároveň i rychle konverguje. Sítě, které mají vysoký poměr R/X či následkem velkého zatížení nízké napětí v uzlu, ale špatně konvergují vlivem zjednodušujících předpokladů FDLF metody [6].

Ze tří popsaných metod tak Newton-Raphsonova metoda v případě rozsáhlých sítí konverguje dostatečně rychle a nejpřesněji. Proto je algoritmus Newton-Raphsonovy metody implementován jako základní metoda pro výpočty load flow v simulačním softwaru *NEPLAN*, který tato diplomová práce používá pro výpočty průběhů příslušných veličin pro dané přechodové procesy.

KAPITOLA 2: PŘECHODOVÉ PROCESY VE VLASTNÍ SPOTŘEBĚ JADERNÉ ELEKTRÁRNY

2.1 Vlastní spotřeba jaderné elektrárny

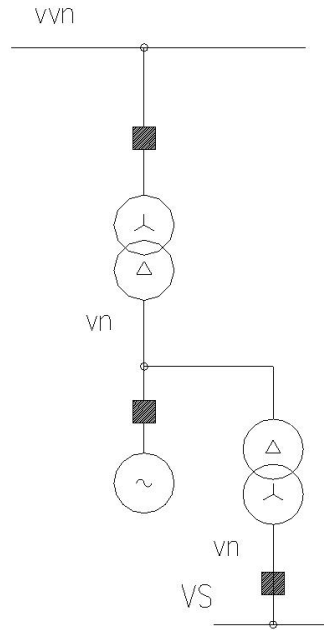
Vlastní spotřebu (VS) lze obecně definovat jako soubor elektrických spotřebičů elektrárny, zejména elektrických pohonů, nutných pro výrobu elektrické energie. Do VS se započítávají i ztráty v rozvodu a transformátorech. Bezporuchový provoz VS je klíčový úkon pro celkový spolehlivý chod elektrárny.

VS jaderné elektrárny (JE) je specifická tím, že v sobě zahrnuje zařízení, která se podílejí na zajišťování jaderné bezpečnosti. Jadernou bezpečnost definuje zákon o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření č. 263/2016 Sb., atomový zákon, v § 4 odstavci 2) jako: „stav a schopnost jaderného zařízení a fyzických osob obsluhujících jaderné zařízení zabránit nekontrolovatelnému rozvoji štěpné řetězové reakce nebo úniku radioaktivních látek anebo ionizujícího záření do životního prostředí a omezit následky nehod [8].“

Zajištění jaderné bezpečnosti závisí i na vhodném řešení elektrického schématu VS. Konkrétní podmínky pro řešení elektrického napájení VS JE udává vyhláška SÚJB o požadavcích na projekt jaderného zařízení č. 329/2017 Sb. Z hlediska jaderné bezpečnosti musí být elektrické napájení VS zajištěno systémem navzájem na sobě nezávislých zdrojů, vyhláška udává v § 42 odstavci 1): „Projekt jaderného zařízení musí zajistit pro systémy důležité pro provoz jaderného zařízení systém navzájem nezávislých zdrojů elektrického napájení tak, aby byla v rozumně proveditelné míře vyloučena možnost selhání elektrického napájení systémů, konstrukcí a komponent s vlivem na jadernou bezpečnost [9].“

K zajištění elektrického napájení tedy musí být dostupný pracovní zdroj napájení VS, rezervní zdroj napájení VS a nouzové autonomní zdroje nacházející se na území elektrárny. Vyhláška č. 329/2017 Sb. dále stanovuje, že projekt jaderného zařízení s jaderným reaktorem o tepelném výkonu vyšším než 50 MW sloužící k výrobě elektrické energie musí být navržen tak, aby obsahoval způsob napájení VS z vlastního generátoru v případě znemožnění vývodu výkonu do vnější sítě [9].

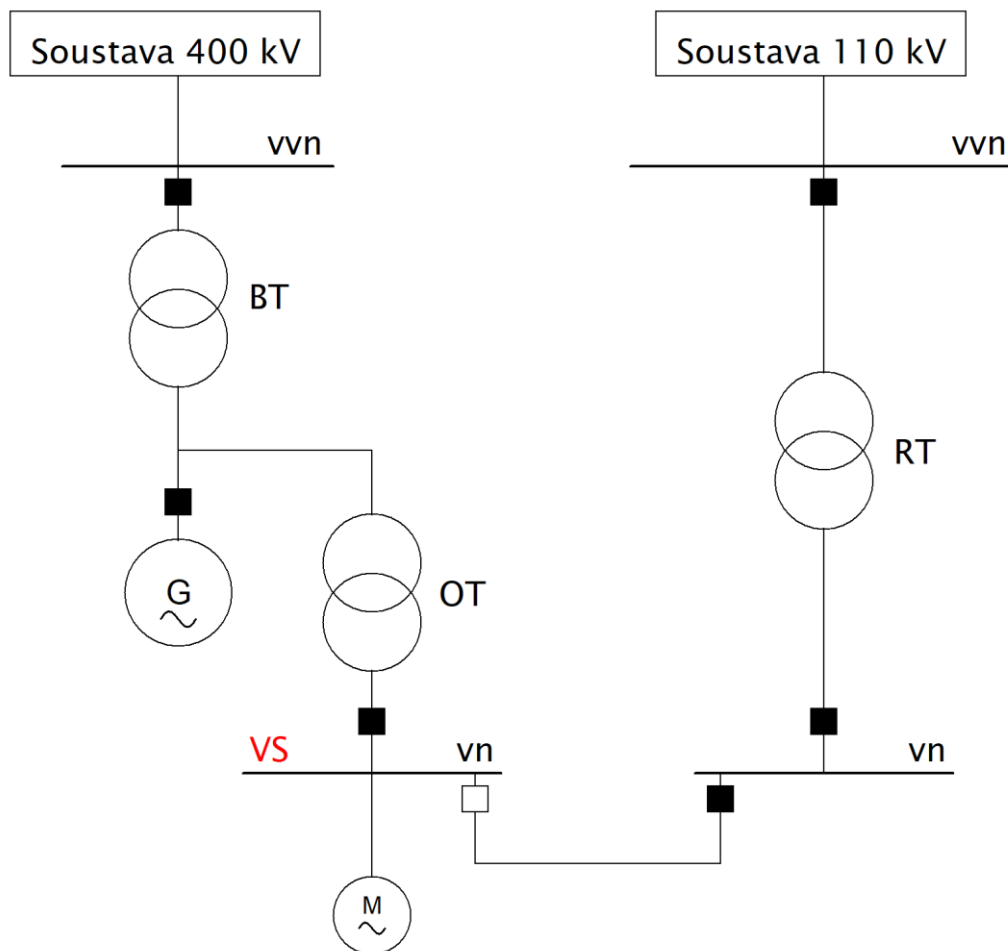
Pracovním zdrojem napájení VS bloku elektrárny je tedy jeden, nebo více odbočkových (regulačních) transformátorů (OT), které jsou připojeny do odbočky ve vyvedení výkonu z generátoru elektrárny do přenosové soustavy. Tyto odbočkové transformátory mohou být napájeny z generátoru nebo přes rozvodnu 400 kV z přenosové soustavy. Principiální příklad zapojení je uveden na Obrázku 2-1 [10].



Obrázek 2.1: Schéma napájení VS přes odbočkový transformátor připojeným do odbočky na vyvedení výkonu generátoru [10].

Jak již bylo zmíněno, tak napájení VS musí být zajištěno rezervním zdrojem pro případ výpadku pracovního zdroje. Rezervní zdroj představuje zpravidla síťová rozvodna 110 kV distribuční soustavy. Dojde-li pak ke ztrátě napájení z pracovního zdroje převezme rezervní zdroj napájení VS pomocí automatického zásoku. Při tomto přechodu dochází ke krátkodobé ztrátě napájení některých spotřebičů a následnému samonajždění motorických spotřebičů.

Problematika opětovného rozběhu pohonů je podrobněji popsána v Kapitole 2.2. Principiální schéma řešení rezervního napájení je ilustrováno na Obrázek 2.2, kde je rezervní zdroj zakreslen vedle pracovního zdroje.



Obrázek 2.2: Principiální schéma řešení rezervního napájení VS pomocí připojení na síťovou rozvodnu 110 kV přes rezervní transformátor

Přechod rozvodů vlastní spotřeby 6 kV z pracovního napájení na rezervní napájení je řízen příslušnými automatikami. K přechodu na rezervní napájení může dojít z následujících příčin:

- Prostým vypnutím linky 400 kV pro vyvedení výkonu bloku elektrárny a následným neúspěšným zregulováním generátoru na napájení VS
- Vypnutím blokového vypínače 400 kV a generátorového vypínače vlivem působení elektrických ochran, př. zkrat na lince 400 kV pro vyvedení výkonu

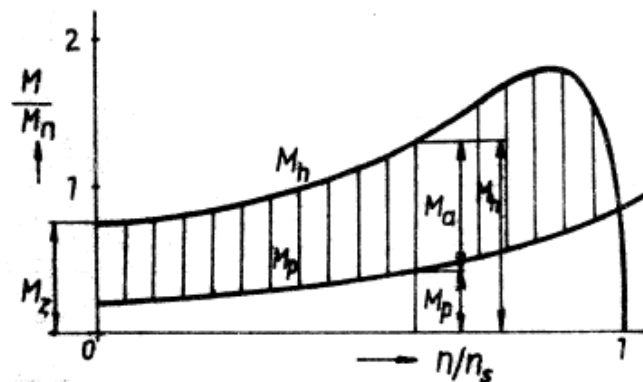
2.2 Pohony ve VS, spouštění spotřebiče a samonajíždění

Nároky na spolehlivost a hospodárnost VS ovlivňuje i vhodná volba elektromotoru jako pohonu zařízení VS. Výkon a úhlová rychlost elektromotoru jsou jednoznačně určeny vlastnostmi a provozními podmínkami poháněného zařízení. Výkon je volen zpravidla o 10–15 % větší než příkon poháněného zařízení v normálním trvalém provozu [12]. Vedle výkonu představuje důležitou vlastnost elektromotoru i záběrný moment, dohromady pak ovlivňují volbu napájecího zdroje vlivem daných proudových zatížení, doby trvání rozběhu a poklesu napětí.

Pro zaručení normálního rozběhu soustrojí VS se při volbě elektromotoru kontrolují:

- Momentová charakteristika motoru vzhledem k momentové charakteristice poháněného zařízení
- Pokles napětí při rozběhu
- Oteplení motoru při rozběhu

Průběh rozběhu pohonu je určen dynamickým momentem M_a , který představuje rozdíl momentu motoru M_h a momentu poháněného zařízení M_p . Příklad momentových charakteristik motoru a poháněného zařízení společně s výsledným M_a a záběrným momentem M_z v poměrných jednotkách vůči jmenovitému momentu M_n je uveden na Obrázek 2.3 [12].



Obrázek 2.3: Momentové charakteristiky motoru a poháněného zařízení [12]

Pro zajištění normálního plynulého rozběhu motoru by během rozběhu neměl být M_a menší jak 20 % z M_n . V naprosté většině případů zařízení VS je tento požadavek splněn, pokud je M_z , který je přepočtený na pokles napětí U_z , na počátku rozběhu o 15–20 % větší jak počáteční zátěžný moment poháněného zařízení M_{po} . Z tohoto poznatku pak lze následně odvodit podmínku na požadovaný jmenovitý moment elektromotoru:

$$M_z \left(\frac{U_z}{U_n} \right)^2 - M_{po} \geq k_a \cdot M_n, \quad (2-1)$$

$$M_n \geq \frac{1}{\frac{M_z}{M_n} \cdot \left(\frac{U_z}{U_n} \right)^2 - k_a} \cdot M_{po}, \quad (2-2)$$

kde $k_a = 0,15$ až $0,2$ představuje činitel dynamického momentu.

Jelikož je jmenovitý moment dán jako $M_n = \frac{P_n}{\omega_n}$, tak je podmínka (2-2) na plynulý rozběh splněna vhodnou volbou asynchronního motoru, který má dostatečně velký jmenovitý činný výkon nebo dostatečně velký záběrný moment.

Pokud je zvolena vhodná momentová charakteristika zajišťující plynulý rozběh, tak je třeba dohlížet i na velikost rozběhového proudu. Elektromotory VS jsou totiž v naprosté

většinou případů řešeny jako asynchronní motory s kotvou nakrátko z důvodu jejich jednoduché konstrukce zajišťující potřebnou spolehlivost [12]. Asynchronní motor s kotvou nakrátko ale vykazuje velký rozběhový proud, který může způsobit nežádoucí pokles napětí na rozvodnách VS. Velikost poklesu napětí může být natolik velká, že omezí normální chod ostatních spotřebičů připojených na stejný rozváděč. Dovoleno pokles napětí se odvíjí od minimální velikosti počátečního dynamického momentu daného soustrojí a na druhu spotřebičů připojených na společnou přípojnicí.

Dojde-li ke zkratu či krátkodobému přerušení napájení, pak dochází k poklesu napětí na svorkách elektromotorů VS. Velikost poklesu napětí je dána elektrickou blízkostí zkratu a elektrickou tvrdostí poruchy.

Vlivem poklesu napětí se sníží momentová charakteristika motoru, změní se pracovní bod charakteristiky a narůstá proud. Sníží-li se momentová charakteristika natolik, že hnací moment klesá pod zátěžný moment pro všechny otáčky, tak se motor začne brzdít a při dlouho trvajícím poklesu se i zastaví. Mezní hodnotu poklesu napětí představuje kritické napětí U_{krit} , při němž moment zvratu motoru dosahuje hodnoty momentu poháněného zařízení. Analyticky lze U_{krit} vyjádřit jako [12]:

$$M_{max}' = M_{max} \cdot \left(\frac{U_{krit}}{U_n}\right)^2 = M_{po}, \quad (2-3)$$

kde M_{max}' značí moment zvratu při kritickém napětí U_{krit} a M_{max} moment zvratu při jmenovitém napětí motoru.

2.2.1 Spouštění největšího spotřebiče

Důležitým případem pro kontrolu poklesu napětí na rozvodnách VS je rozběh pohonu o největším výkonu ve VS — spouštění největšího spotřebiče. Jde o přechodný stav, kdy je plně zajištěn provoz VS, napájecí zdroj VS je tak zatížen předchozím zatížením S_Σ , zároveň dochází k rozběhu největšího elektromotoru. Při rozběhu pohonu s elektromotorem se kontroluje úbytek napětí na rozvodně, ze které je elektromotor napájen a na vstupních svorkách ostatních elektromotorů napájených ze stejného rozvodu.

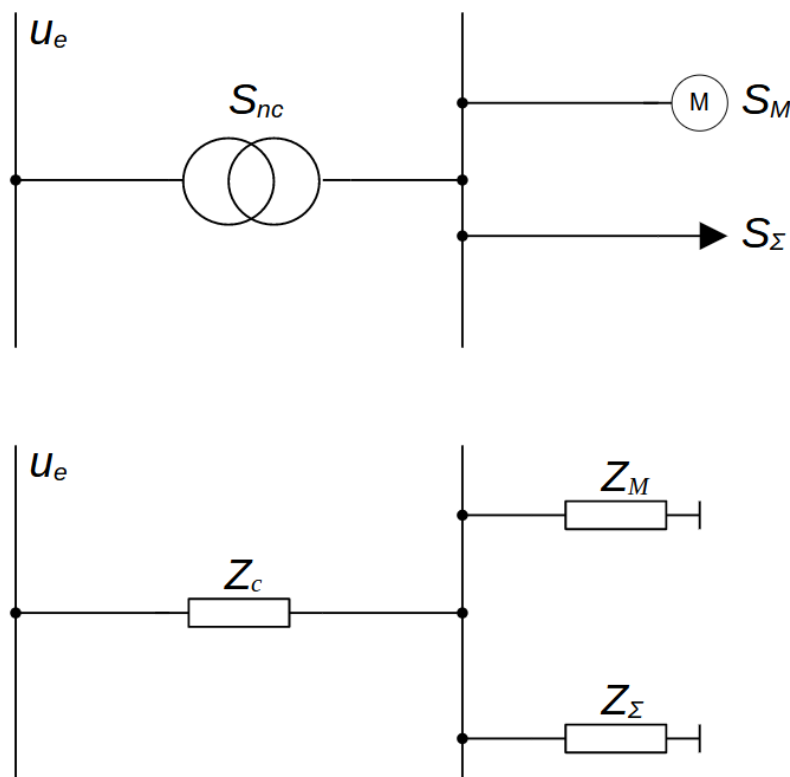
Konkrétní podmínky na velikost napětí při spouštění pohonů s elektromotory udává norma ČSN 38 1120 [13]:

1. Při normálním spouštění pohonu s elektromotorem přímo napájeným ze sítě nemá napětí na přípojnicích rozvodného zařízení, ze kterého jsou motory napájeny, klesnout po odeznění elektromagnetického přechodového děje pod 85 % z U_N
2. Celkově napětí na vstupních svorkách ostatních elektromotorů, které jsou napájené ze stejného rozváděče, nesmí klesnout pod 80 % z U_N

Zjednodušující předpoklady pro výpočet úbytku napětí při spouštění největšího spotřebiče jsou následující:

1. Počítá se pouze jalová složka proudu předběžné zátěže.
2. Všechny elektromotory pracují s jmenovitým zdánlivým výkonem a jmenovitým účinníkem při jmenovitém zatížení bloku.
3. Napětí napájení z generátoru či elektrické soustavy 400 kV se uvažuje konstantní $u_e = \text{konst.}$
4. Úbytky napětí na přívodech k elektromotorům se zanedbávají.
5. Zanedbávají se rezistence elektrických strojů (transformátory, generátor a pohony s elektromotory) uvažují se pouze reaktance, pro kabely se už uvažují rezistence i reaktance.

Proces spouštění největšího spotřebiče je ilustrován na Obrázek 2.4. Po elektrickém schématu následuje výpočetní schéma s náhradními impedancemi:



Obrázek 2.4: Elektrické a výpočetní schéma ilustrující spouštění největšího spotřebiče ve VS

Impedance spuštěných pohonů se uvažuje pouze jako reaktance, vypočítá se následovně:

$$z_{\Sigma} = x_{\Sigma} = \frac{S_v}{\sum \sin \varphi_i S_i'} \quad (2-4)$$

kde suma $\sum \sin \varphi_i S_i'$ představuje tedy jalovou složku předběžného zatížení S_{Σ} , což je součet skutečně odebíraných výkonů spotřebičů, které jsou současně v chodu při spouštění největšího spotřebiče, vztažený výkon S_v je volen jako výkon napájecího transformátoru S_{nc} .

Impedance největšího spotřebiče z_M se uvažuje pouze jako reaktance x_M , vypočítá se dle záběrného proudu největšího spotřebiče i_{z_M} a zdánlivého příkonu největšího spotřebiče S_M :

$$z_M = x_M = \frac{1}{i_{z_M}} \cdot \frac{S_v}{S_M}. \quad (2-5)$$

Z takto získaných impedancí je pak možné vypočítat zatěžovací impedanci z_z jako paralelní kombinaci reaktance předběžného zatížení a reaktance největšího spotřebiče a následně výsledný kontrolovaný pokles napětí Δu :

$$z_z = x_z = \frac{x_M \cdot x_\Sigma}{x_M + x_\Sigma}, \quad (2-6)$$

$$\Delta u = u_e \cdot \frac{z_c}{z_c + z_z}. \quad (2-7)$$

2.2.2 Samonajíždění pohonů VS

Samonajíždění je rozběh skupiny pohonů VS vlivem přerušení napájení. Pokles napětí je při samonajíždění větší než při běžném rozběhu jednoho pohonu, neboť rozběhový proud skupiny pohonů podílejících se na samonajíždění je větší než rozběhový proud samostatného pohonu. Dle ČSN 38 1120 při rozběhu pohonů ze samonajíždění nemá napětí na svorkách elektromotorů klesnout pod hodnotu 65 % z U_N . Norma připouští i větší pokles napětí, pokud tedy technický rozbor nebo podrobný výpočet prokáže, že se pohony bezpečně rozběhnou [13].

Pokles napětí na svorkách elektromotorů je i předmětem normy pro elektrický silnoproudý rozvod v průmyslových provozovnách ČSN 34 1610. Dle normy je přípustný pokles napětí dán dodavatelem elektrického stroje. V zjednodušených, méně významných situacích lze pro rozběh asynchronního pohonu uvažovat vztah určující limitní poměrnou velikost poklesu napětí na svorkách elektromotorů, která je dána rozběhovými hodnotami elektromotoru [14]:

$$\Delta u = \frac{m - \sqrt{km}}{m} \cdot 100, \quad (2-8)$$

kde m představuje poměr záběrného momentu k momentu jmenovitému M_z/M_n , k je poměr potřebného záběrného momentu pro rozběh poháněného zařízení vůči jmenovitému momentu M_{po}/M_n .

Výpočet samonajíždění je dán dle požadované přesnosti výsledku. Většinou totiž stačí zkontrolovat počáteční pokles napětí, zdali nepřekročil požadovanou mez 65 % z U_N a dle výsledku vyhodnotit možnost samonajíždění pohonů. S uvažováním této situace lze při výpočtech samonajíždění uplatnit následující zjednodušující předpoklady [11]:

1. Neuvažuje se skutečný skluz motorů, otáčky všech motorů jsou nulové, skluz je tedy $s = 1$.

2. Při výpočtech úbytků napětí se zanedbávají rezistence elektrických strojů (transformátory, generátor a pohony s elektromotory) uvažují se pouze reaktance, pro kabely se už uvažují rezistence i reaktance.
3. Úbytky napětí na přívodech k elektromotorům se zanedbávají.
4. Napětí napájecího zdroje se uvažuje konstantní $u_e = \text{konst.}$
5. Může se uvažovat pro všechny motory stejný záběrný proud.

Následně lze analyticky vyjádřit impedanci skupiny elektromotorů z_{SN} podílejících se na samonajíždění, která se dle uvedeného zjednodušujícího předpokladu uplatňuje pouze jako reaktance:

$$z_{SN} = x_{SN} = \frac{S_v}{\sum i_{z_i} \cdot S_i} \quad (2-9)$$

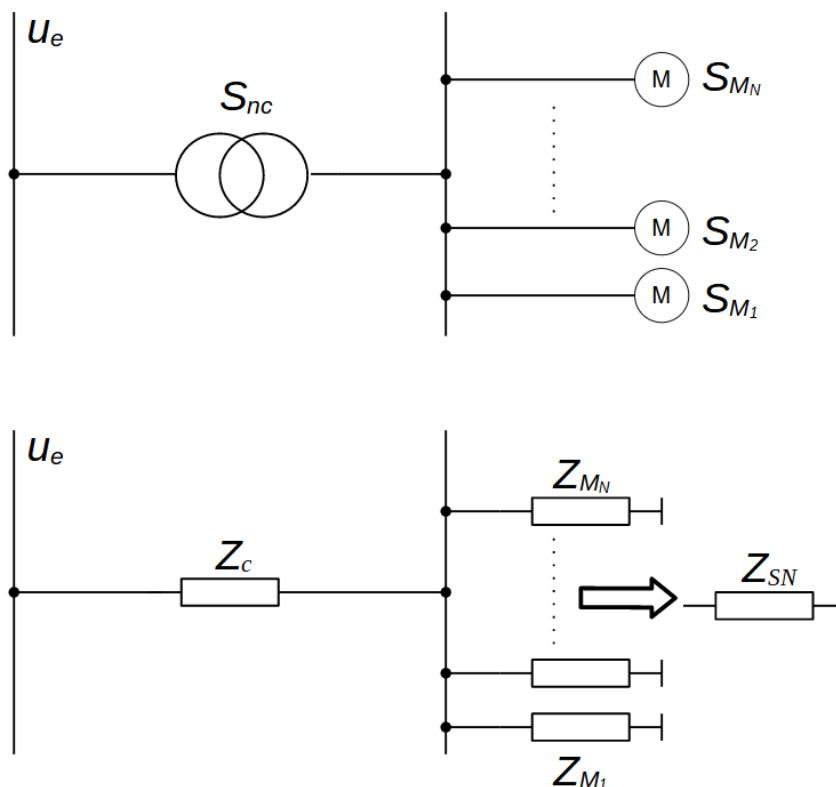
kde i_{z_i} představuje záběrný proud i -tého spotřebiče. S_v je vztažný výkon, který se zpravidla uvažuje jako zdánlivý výkon příslušného rezervního transformátoru VS. S_i představuje jmenovitý zdánlivý příkon elektromotoru podílejícího se na samonajíždění.

Pomocí vypočítané impedance skupiny elektromotorů pak lze určit výsledné poměrné napětí na rozvodně 6 kV, při uvedených zjednodušujících předpokladech i na svorkách elektromotorů, pro kontrolu dovoleného napětí při samonajíždění:

$$u = \frac{z_{SN}}{z_c + z_{SN}} \cdot u_e, \quad (2-10)$$

kde z_c značí celkovou reaktanci napájecí cesty a u_e napětí napájecího zdroje.

Proces samonajíždění je ilustrován na elektrickém a následně výpočetním schématu na Obrázek 2.5.



Obrázek 2.5: Elektrické a výpočetní schéma ilustrující samonajíždění pohonů ve VS

Pokud pokles napětí znemožní rozběh pohonů, tak je řešen jednou z následujících variant [11]:

- Zvýšením výkonu transformátoru provádějícího rezervní napájení či zmenšení jeho reaktance nakrátko
- Omezení výkonu pohonů — postupným spouštěním jednotlivých pohonů dle technologické priority

2.3 Přechod napájení VS na rezervní zdroj

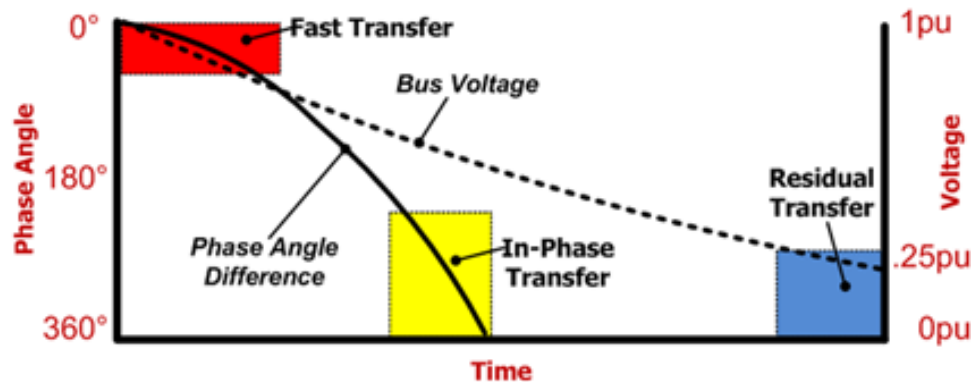
Přechod napájení na rezervní zdroj VS může být vyvolán dvěma způsoby. Buďto je způsoben plánovaně a úmyslně na příkaz obsluhy za účelem údržby zařízení VS či najíždění nebo dobíhání elektrárny, nebo je zapříčiněn neplánovaně vlivem poruchy a ztráty napájení na pracovním zdroji VS. Přechod na rezervní zdroj musí zajistit napájení VS takovým způsobem, aby na pohonech VS nevznikal přechodový děj vykazující takové změny proudu a momentu, jejichž vlivem by mohli být pohony VS mechanicky poškozeni.

Přechody napájení VS lze klasifikovat do dvou základních skupin z hlediska ztráty napětí na přípojnicích rozvodného zařízení VS: přechod beze ztráty napájení (closed transition) a přechod se ztrátou napájení (open transition). Při přechodu beze ztráty napájení jsou pracovní i rezervní zdroj v paralelním provozu, proto se označuje jako paralelní přechod (Hot Parallel Transfer).

Přechod se ztrátou napětí lze uskutečnit hned několika způsoby [15]:

1. Rychlý přechod (Fast Transfer)
2. Přechod ve fázi (In-Phase Transfer)
3. Přechod na základě podpětí (Residual Voltage Transfer)
4. Přechod v nastaveném čase (Fixed Time Transfer)

Před přechodem na rezervní napájení dochází zpravidla k vyhodnocení velikostí napětí na přípojnících VS obou zdrojů a fázového posunu napětí mezi oběma zdroji. Přechody se ztrátou napájení se pak z hlediska těchto dvou sledovaných veličin rozdělují do zón vyobrazených v grafu na Obrázek 2.6 [16].



Obrázek 2.6: Graf zón jednotlivých přechodů se ztrátou napájení s odpovídajícími fázovými posuny a velikostmi napětí [16]

2.3.1 Paralelní přechod

Při paralelním přechodu sepíná vypínač rezervního zdroje v okamžiku před vypnutím vypínače pracovního zdroje. Jak již bylo uvedeno, tak jsou oba zdroje na krátkou dobu paralelně v provozu, což umožňuje přecházet na rezervní zdroj beze ztráty napájení. Před skutečným přechodem musí být zajištěn fázový synchronismus zdrojů, aby byl eliminován vznik přechodových dějů. Tato metoda se zpravidla uplatňuje při plánovaných přechodech na rezervní napájení, při poruchových neplánovaných přechodech je nerealizovatelná [16].

2.3.2 Rychlý přechod

Podobně jako v případě paralelního přechodu je kladen důraz na zajištění synchronismu zdrojů, nebo alespoň minimálního fázového posunu napětí rezervního zdroje oproti pracovnímu zdroji. Takovéto podmínce odpovídá zóna červeně vyznačená na Obrázku 2-5. Jeli fázový úhel mezi pracovním a rezervním přívodem v okamžiku inicializace požadavku na záskok na rezervní napájení menší než nastavená hodnota, tak je vydán povel pro vypnutí vypínače pracovního zdroje a ve stejném okamžiku i povel pro sepnutí vypínače rezervního zdroje. Vlivem rychlosti přepnutí jsou omezeny přechodové děje [15].

2.3.3 Přechod ve fázi

Toto přepnutí na rezervní napájení proběhne v případě další schody fází napětí pracovního a rezervního zdroje (pro nastavenou odchylku) v případě, že rozdíl frekvencí je pod nastavenou hodnotou. Jelikož při přechodu ve fázi velmi rychle klesá frekvence napětí na rozvodně VS, tak tento přechod vyžaduje užití rychlé měřící a řídicí techniky.

Signál k sepnutí vypínače rezervního zdroje je vydán v předstihu očekávaného sledu fází, který se předpovídá na základě výpočtu uvažujícího klesající frekvenci na rozvodně VS, fázový posun, rozdíl frekvence a časovou derivaci rozdílu frekvence. Přechodu ve fázi odpovídá na Obrázek 2.6 žlutě vyznačená zóna, je tedy patrné, že je rychlejší než přechod na základě podpětí a přechod v nastaveném čase. Společně s rychlým přechodem pak nejlépe zachovávají kontinuitu procesů ve VS [17].

2.3.4 Přechod na základě podpětí

K tomuto přechodu dojde v případě, kdy napětí na rozvodně VS klesne pod nastavenou hodnotu, př. 0,25 p. j. Nehledě na fázový posun mezi zdroji dojde k přepnutí na rezervní zdroj. Tato skutečnost je vyobrazena jako modře vyznačená zóna na Obrázku 2-5.

2.3.5 Přechod v nastaveném čase

K přechodu na rezervní zdroj dojde po nastaveném časovém zpoždění. Plní funkci záložního kanálu k ostatním jmenovaným přechodům. V tomto případě dochází k nejnepříznivějšímu průběhu přechodového děje.

KAPITOLA 3: DEFINICE VÝPOČETNÍHO MODELU

Předmětem zkoumání přechodových stavů ve VS je fiktivní jaderná elektrárna, která je uspořádána do jednoho elektrárenského bloku. Elektrárenský blok tvoří dva turbogenerátory o jmenovitém výkonu $P_{Tgn} = 270$ MW. Elektrický výkon z turbogenerátorů je vyveden přes blokové transformátory (BT) do elektrické soustavy 400 kV, která vykazuje rázový zkratový výkon $S_{ks} = 5,5$ GVA.

VS je v normálním provozu napájena přes trojvintuťové odbočkové transformátory (OB), které mohou být napájeny odbočkou od turbogenerátoru, nebo pokud je vypnut generátorový vypínač přes BT ze soustavy 400 kV. Napájení VS je rozděleno do 4 blokových rozveden 6 kV značených BA až BD. Z každé rozvodny 6 kV je pak napájena dvojice transformátorů vn/nn, přes které jsou napájeny rozvodny VS nízkého napětí.

Rezervní napájení VS zajišťuje trojvintuťový rezervní transformátor (RT) napájený ze soustavy 110 kV o rázovém zkratovém výkonu $S_{ks} = 2$ GVA. V případě přechodu na rezervní zdroj jsou přes sekundární vinutí rezervního transformátoru napájeny rozvodny 6 kV BA a BD, přes terciální vinutí pak rozvodny BB a BC. Elektrické schéma zkoumané jaderné elektrárny je zakresleno v Příloha B:

Detailní výpis parametrů jednotlivých zařízení elektrárny je uveden v následujících podkapitolách. Tyto parametry se pak používají jako výchozí hodnoty pro zjednodušený výpočet přechodových procesů užívaných vztahů popsaných v Kapitole 2.2, tak i pro modelování VS elektrárny v simulačním software *NEPLAN*.

3.1 Turbogenerátor

Turbogenerátor je trojfázový synchronní stroj o dvou pólech. Elektrárenský blok je vybaven dvěma shodnými turbogenerátory, jejichž parametry jsou uvedeny níže.

Tabulka 3-1: Parametry turbogenerátoru

Jmenovitý zdánlivý výkon S_n (MVA)	300
Jmenovitý činný výkon P_n (MVA)	270
Jmenovité napětí U_n (kV)	15,75
Účinník $\cos\varphi$ (-)	0,9
x_d (%)	196
x_d' (%)	33,9
x_d'' (%)	22,4
Jmenovité otáčky n (ot./min.)	3000

3.2 Blokový transformátor

Blokové transformátory (BT) slouží k přeměně napětí z turbogenerátoru 15,75 kV na napětí uzpůsobené k vyvedení přes rozvodnu 400 kV elektrárny do přenosové soustavy.

Blokové transformátory jsou na elektrárenském bloku přítomny dva, ke každému turbogenerátoru je přiřazen jeden dvojinuťový BT.

Tabulka 3-2: Parametry blokového transformátoru

Jmenovitý výkon S_n (MVA)	300
Jmenovité napětí U_{n1}/U_{n2} (kV)	$420 \pm 2 \times 2,5 \%$ /15,75
Napětí nakrátko u_k (%)	13,85
Proud naprázdno I_0 (%)	0,06
Spojení vinutí transformátoru	YNd1

3.3 Odbočkový transformátor

Trojvinuťové odbočkové transformátory (OT) jsou na elektrárenském bloku přítomny dva, každý transformuje napětí turbogenerátoru 15,75 kV na hodnotu 6,3 kV pro napájení rozvodu VS s uvažováním ztrát.

Tabulka 3-3: Parametry odbočkového transformátoru

Jmenovitý výkon S_n (MVA)	16
Jmenovité napětí $U_{n1}/U_{n2}/U_{n3}$ (kV)	$15,75 \pm 8 \times 2 \%$ /6,3/6,3
Napětí nakrátko $u_{k12}/u_{k23}/u_{k31}$ (%)	7,5/15,1/7,5
Proud naprázdno I_0 (%)	0,2
Spojení vinutí transformátoru	Dd0d0

3.4 Rezervní transformátor

Trojvinuťový rezervní transformátor (RT) přebírá napájení VS v případě přechodu z pracovního zdroje napájení VS na rezervní zdroj, tedy soustavu 110 kV.

Tabulka 3-4: Parametry rezervního transformátoru

Jmenovitý výkon S_n (MVA)	31,5
Jmenovité napětí $U_{n1}/U_{n2}/U_{n3}$ (kV)	$110 \pm 8 \times 2 \%$ /6,3/6,3
Napětí nakrátko $u_{k12}/u_{k23}/u_{k31}$ (%)	9/17/9
Proud naprázdno I_0 (%)	0,15
Spojení vinutí transformátoru	YNd1d1

3.5 Transformátor VS

Transformátory VS slouží k převodu vn napětí z rozvodu 6 kV VS na nn napětí pro napájení nn spotřebičů z rozvodu 0,4 kV VS.

Tabulka 3-5: Parametry transformátoru VS

Jmenovitý výkon S_n (MVA)	1,25
Jmenovité napětí U_{n1}/U_{n2}	$6 \pm 2 \times 2,5 \% / 0,42$
Napětí nakrátko u_k (%)	6,3
Proud naprázdno I_0 (%)	1,2
Spojení vinutí transformátoru	Dyn1

3.6 Soustava

Pro výpočty přechodových procesů je uvažováno s následujícími parametry v příslušných rozvodnách přenosové a distribuční soustavy.

Tabulka 3-6: Parametry soustavy 400 kV

Rázový zkratový výkon S_k'' (GVA)	5,5
Rázový zkratový proud I_k'' (kA)	8

Tabulka 3-7: Parametry soustavy 110 kV

Rázový zkratový výkon S_k'' (GVA)	1,9
Rázový zkratový proud I_k'' (kA)	10

3.7 Vedení

Uvažují se následující parametry vedení mezi přenosovou soustavou 400 kV a BT a distribuční soustavou 110 kV a RT.

Tabulka 3-8: Parametry vedení soustava 400 kV-BT

Délka (km)	10
Počet linek	1
Měrný odpor R (Ω/km)	0,023
Měrná reaktance X (Ω/km)	0,289
Měrná kapacita C ($\mu\text{F}/\text{km}$)	0,0128
Měrná susceptance B (S/km)	4

Tabulka 3-9: Parametry vedení soustava 110 kV-RT

Délka (km)	7,3
Počet linek	1
Měrný odpor R (Ω/km)	0,118
Měrná reaktance X (Ω/km)	0,4
Měrná kapacita C ($\mu\text{F}/\text{km}$)	0,009
Měrná susceptance B (S/km)	2,858

3.8 Kabely

Kabely slouží pro rozvod VS. Z hlediska analýzy přechodových procesů ve VS jsou důležité přívodní kabely elektromotorů. Tyto silové kabely jsou typu 6-AYKCY 3x185 mm². Parametry kabelu jsou uvedeny v Tabulka 3-10, typické délky přívodních kabelů k jednotlivým elektromotorům jsou pak zaznamenány v Tabulka 3-11.

Tabulka 3-10: Přívodní kabel elektromotorů 6-AYKCY 3x185

Měrný odpor R (Ω/km)	0,1
Měrná reaktance X (Ω/km)	0,09
Měrná kapacita C ($\mu\text{F}/\text{km}$)	0,36

Tabulka 3-11: Typické délky přívodních kabelů motorů jednotlivých pohonů

Pohon	l (km)
CCHV	0,9 až 1
HCC	0,08 až 0,16
CKO1	0,08 až 0,12
CKO2	0,08 až 0,1
LAC	0,09 až 0,13
PKJ	0,45
CTVN	0,9

3.9 Pohony VS

Jednotlivá rozmístění pohonů na rozvodech 6 kV BA, BB, BC a BD jsou patrná z elektrického schématu elektrárny v Příloha B: Spotřebič o největším výkonu je čerpadlo chladící vody CCHV o jmenovitém výkonu $P_n = 4,8$ MW, které je umístěno na rozvodech BB a BD. Parametry pohonů VS připojených na rozvodech 6 kV jsou uvedeny v Tabulka 3-12.

Tabulka 3-12: Seznam pohonů VS napájených z rozvoden 6 kV včetně jejich parametrů

Pohon	Označení	U_n (kV)	P_n (MW)	$\cos\varphi$ (-)	η (-)	i_z (-)	n (ot./min.)
Hlavní cirkulační čerpadlo	HCC	6	1,6	0,89	0,95	7,5	1485
Kondenzační čerpadlo 1. stupně	CKO1	6	0,2	0,87	0,944	5	987
Kondenzační čerpadlo 2. stupně	CKO2	6	0,5	0,88	0,941	6	1492
Napájecí čerpadlo	LAC	6	2,1	0,88	0,96	4,6	2975
Čerpadlo chladící vody	CCHV	6	4,8	0,82	0,955	5,9	371
Kompresor	PKJ	6	0,63	0,86	0,97	6,2	1488
Čerpadlo TCHVN	CTVN	6	0,2	0,9	0,944	5	1479

Pohony VS napájené z rozvodů 0,4 kV jsou uvažovány jako dva typické ekvivalentní modely pohonů, jeden reprezentující ventilátor a druhý čerpadlo. Jejich parametry jsou uvedeny v Tabulka 3-13.

Tabulka 3-13: Seznam pohonů VS napájených z rozvodu 0,4 kV včetně jejich parametrů

Pohon	Označení	U_n (kV)	P_n (MW)	$\cos\varphi$ (-)	η (-)	i_z (-)	n (ot./min.)
Ekvivalentní ventilátor	VENT	0,4	0,075	0,86	0,96	7	1487
Ekvivalentní čerpadlo	CERP	0,4	0,16	0,89	0,94	5,94	1483

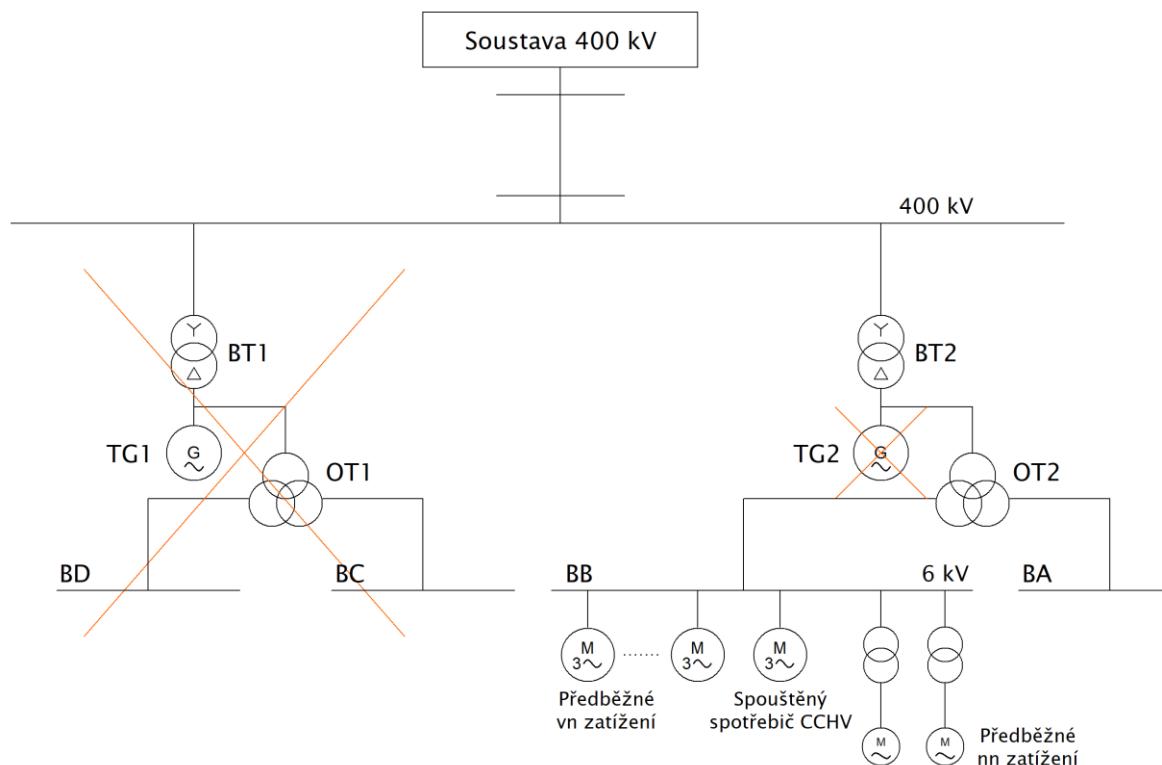
KAPITOLA 4: ZJEDNODUŠENÝ ORIENTAČNÍ VÝPOČET PŘECHODOVÝCH STAVŮ VE VLASTNÍ SPOTŘEBĚ JADERNÉ ELEKTRÁRNY

4.1 Spouštění největšího spotřebiče

Při spouštění největšího spotřebiče čerpadla chladící vody CCHV se uvažuje následující situace. Generátorový vypínač je vypnutém stavu. Oba turbogenerátory tak nejsou v provozu a při výpočtech se neuplatňují. Rozvodny VS jsou napájeny přes OT a BT ze soustavy 400 kV. Zkoumá se pokles napětí na jedné ze dvou rozvodných zařízení, kde jsou spotřebiče CCHV připojeny, tedy rozvodů BB a BD. Analyzován je nejhorší možný případ spouštění největšího spotřebiče, proto byl pro výpočet vybrán rozvod BB. Protože součtový příkon pohonů připojených na rozvod BB je větší než v případě rozvodu BD.

Při výpočtu se tedy uplatní pouze reaktance transformátorů BT2 a OT2, přes které je rozvod BB napájen. Impedance transformátorů BT1 a OT1 se tedy při výpočtech neuplatní.

Před spouštěním největšího spotřebiče CCHV jsou tedy v provozu všechny pohony (kromě čerpadel CCHV) napájené z rozvodu BB včetně nn pohonů napájených z rozvodu 0,4 kV. Spouštění největšího spotřebiče CCHV je znázorněno na schématu na Obrázek 4.1.



Obrázek 4.1: Schéma vykreslující kontrolovanou situaci při spouštění největšího spotřebiče

4.1.1 Výpočetní kontrola poklesu napětí na přípojnici rozvodného zařízení VS při spouštění největšího spotřebiče

Výpočet je proveden ve vztažných jednotkách, jako vztažné napětí je zvoleno jmenovité napětí rozvodu VS $U_v = 6$ kV a jako vztažný výkon je vybrán jmenovitý výkon OT $S_v = 16$ MVA. Seznam pohonů napájených z rozvodu BB je uveden v Tabulka 4-1, včetně jejich parametrů potřebných pro výpočet. Hodnoty vychází ze základních parametrů v Tabulka 3-12, z účinnosti byl dopočítán činný příkon pohonu a následně z účinníku jalový příkon nutný pro výpočet předběžného zatížení.

Tabulka 4-1: Parametry pohonů napájených z rozvodu BB nutné pro výpočet poklesu napětí při spouštění největšího spotřebiče

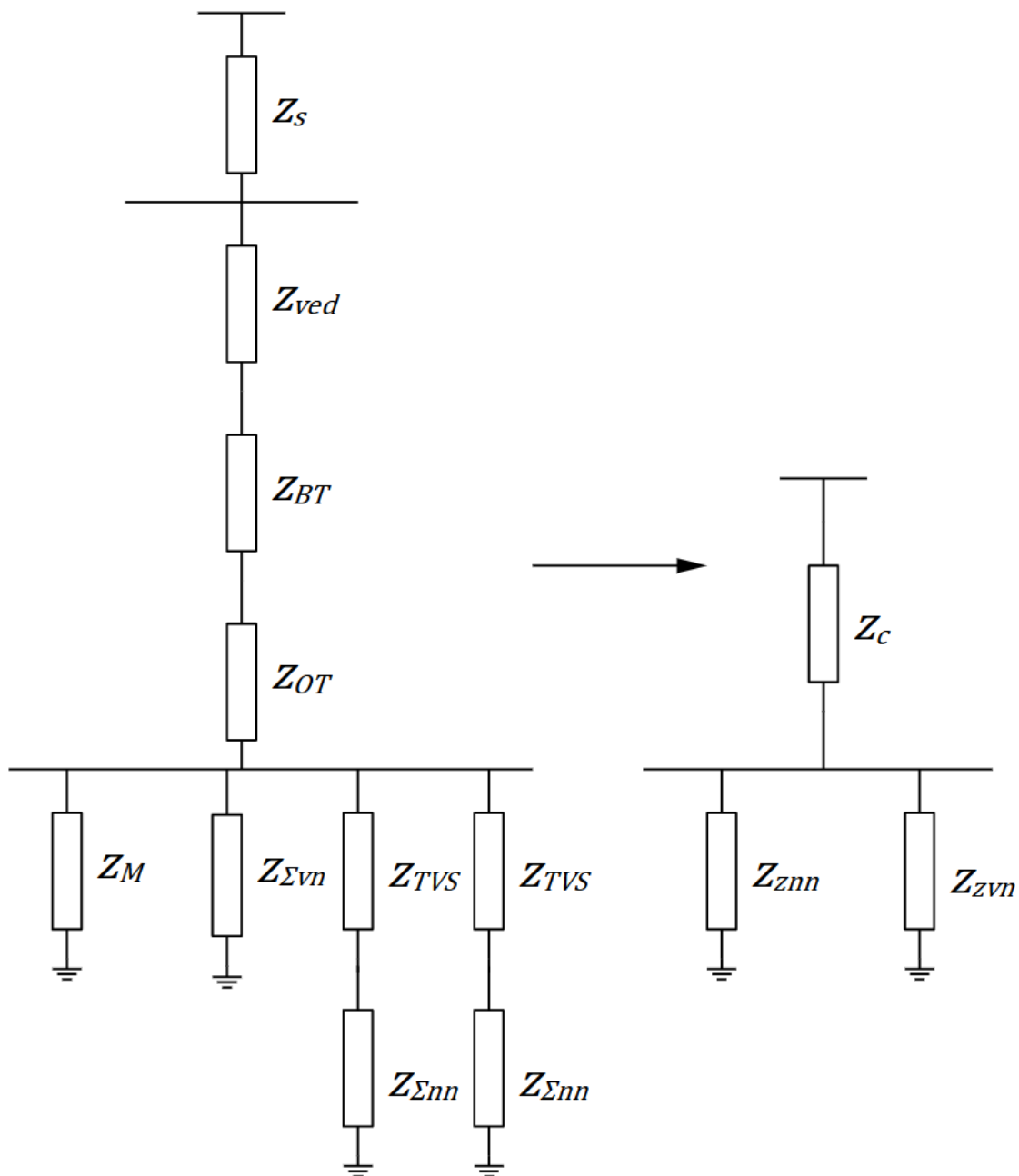
Označení	U_n (kV)	P_n (MW)	$\cos\varphi$ (-)	η (-)	i_z (-)	P (MW)	Q (MVA)
LAC	6	2,1	0,88	0,96	4,6	2,19	1,18
CKO1	6	0,2	0,87	0,944	5	0,21	0,12
CKO2	6	0,5	0,88	0,941	6	0,53	0,29
HCC	6	1,6	0,89	0,95	7,5	1,68	0,86
CCHV	6	4,8	0,82	0,955	5,9	5,03	3,51
PKJ	6	0,63	0,86	0,97	6,2	0,65	0,39

Pohony napájené z rozvodu 0,4 kV jsou modelovány jako dva typy ekvivalentních pohonů o určitém počtu, seznam nn pohonů napájených přes transformátory VS včetně jejich parametrů je zaznamenán v Tabulka 4-2.

Tabulka 4-2: Parametry nn pohonů napájených z rozvodu BB přes transformátor VS nutné pro výpočet poklesu napětí při spouštění největšího spotřebiče

Pohon	U_n (kV)	P_n (MW)	$\cos\varphi$ (-)	η (-)	i_z (-)	P (MW)	Q (MVA)	Počet
Ekv. ventilátor	0,4	0,075	0,86	0,96	7	0,08	0,05	5
Ekv. čerpadlo	0,4	0,16	0,89	0,94	5,94	0,17	0,09	4

Výpočetní schéma s uvažovanými impedancemi je na Obrázek 4.2. Celková impedance napájecí cesty je dána součtem reaktancí BT2, OT2, vedení a soustavy 400 kV, jak je patrné z Obrázek 4.1. Zatěžovací impedance z_z dle (2-6) je paralelní kombinace impedance spouštěného spotřebiče z_M a impedance předběžného zatížení z_Σ . Výsledný úbytek napětí se pak vypočítá přes napěťový dělič (2-7). Výpočet je proveden na základě parametrů definovaných v Kapitola 3:.



Obrázek 4.2: Výpočtové schéma spouštění největšího spotřebiče

Výpočet impedance soustavy 400 kV:

$$z_s = x_s = \frac{U_s^2 S_V}{S_{ks} U_v^2} \cdot p_{OT}^2 \cdot p_{BT}^2 = \frac{400^2 16}{5500 6^2} \cdot \left(\frac{6,3}{15,75}\right)^2 \cdot \left(\frac{15,75}{420}\right)^2 \cong 0,003 \text{ p.j.}$$

Výpočet impedance vedení mezi soustavou 400 kV a BT:

$$X_{ved} = x_{km} \cdot l = 0,289 \cdot 10 = 2,89 \Omega$$

$$R_{ved} = r_{km} \cdot l = 0,023 \cdot 10 = 0,23 \Omega$$

$$Z_{ved} = \sqrt{R_{ved}^2 + X_{ved}^2} = \sqrt{0,23^2 + 2,89^2} = 2,9 \Omega$$

$$z_{ved} = Z_{ved} \cdot \frac{S_V}{U_v^2} \cdot p_{OT}^2 \cdot p_{BT}^2 = 2,9 \cdot \frac{16}{6^2} \cdot \frac{6,3^2}{15,75^2} \cdot \frac{15,75^2}{420^2} = 0,00029 \text{ p.j.}$$

Výpočet impedance blokového transformátoru 420/15,75 kV:

$$z_{BT} = x_{BT} = u_{k\%} \cdot \frac{U_{nBT}^2}{S_{nBT}} \cdot \frac{S_V}{U_v^2} \cdot p_{OT}^2 = 0,1385 \cdot \frac{15,75^2}{300} \cdot \frac{16}{6^2} \cdot \left(\frac{6,3}{15,75}\right)^2 \cong 0,008 \text{ p.j.}$$

Výpočet impedance odbočkového transformátoru 15,75/6,3 kV:

$$z_{OT} = x_{OT} = u_{k\%} \cdot \frac{U_{nOT}^2}{S_{nOT}} \cdot \frac{S_V}{U_v^2} = 0,075 \cdot \frac{6,3^2}{16} \cdot \frac{16}{6^2} \cong 0,083 \text{ p.j.}$$

Celková impedance napájecího systému vychází jako součet impedancí OT, BT, vedení a soustavy 400 kV:

$$z_c = z_{OT} + z_{BT} + z_s + z_{ved} = 0,003 + 0,008 + 0,087 + 0,00029 \cong 0,094 \text{ p.j.}$$

Předběžné zatížení vn spotřebičů je dáno součtem jalových výkonů vn spotřebičů připojených k BB vyjma největšího spotřebiče:

$$Q_{\Sigma vn} = \sum_{i=1}^n Q_i - Q_m = 2,84 \text{ MVar}$$

Výpočet impedance předběžného zatížení na rozvodně 6 kV:

$$z_{\Sigma vn} = x_{\Sigma vn} = \frac{S_V}{Q_{\Sigma vn}} = 5,64 \text{ p.j.}$$

Výpočet impedance největšího spotřebiče:

$$z_M = x_M = \frac{1}{i_{zM}} \cdot \frac{S_v}{S_M} = \frac{1}{5,9} \cdot \frac{16}{6,13} = 0,44 \text{ p.j.}$$

Výpočet zatěžovací impedance vn elektromotorů:

$$z_{zVN} = \frac{z_M \cdot z_{\Sigma vn}}{z_M + z_{\Sigma vn}} = \frac{0,44 \cdot 5,64}{0,44 + 5,64} = 0,4 \text{ p.j.}$$

Výpočet impedance transformátorů VS:

$$z_{TVS} = x_{TVS} = u_{k\%} \cdot \frac{U_{nTVS}^2}{S_{nTVS}} \cdot \frac{S_V}{U_v^2} = 0,063 \cdot \frac{6^2}{1,25} \cdot \frac{16}{6^2} \cong 0,8 \text{ p.j.}$$

Impedance zatížení skupiny nn pohonů:

$$z_{\Sigma nn} = x_{\Sigma nn} = \frac{U_{nn}^2}{Q_{\Sigma nn}} \cdot \frac{S_V}{U_v^2} \cdot p_{TVS}^2 = \frac{6^2}{0,58} \cdot \frac{16}{6^2} \cdot \frac{6^2}{0,42^2} = 25 \text{ p.j.}$$

Sériová kombinace transformátorů VS a nn elektromotorů:

$$z_{nn} = x_{nn} = x_{TVS} + x_{\Sigma nn} = 25,8 \text{ p. j.}$$

Celková zatěžovací impedance zařízení náležících k rozvodu 0,4 kV:

$$z_{znn} = \frac{z_{nn} \cdot z_{nn}}{z_{nn} + z_{nn}} = \frac{25,8 \cdot 25,8}{25,8 + 25,8} = 12,9 \text{ p. j.}$$

Celková zatěžovací impedance:

$$z_z = \frac{z_{zvn} \cdot z_{znn}}{z_{zvn} + z_{znn}} = \frac{0,4 \cdot 12,9}{0,4 + 12,9} \cong 0,4 \text{ p. j.}$$

Výpočet kontrolovaného poklesu napětí na přípojnici rozvodu BC:

$$\Delta u = u_e \cdot \frac{z_c}{z_c + z_z} = 1 \cdot \frac{0,094}{0,094 + 0,4} = 0,19 \text{ p. j.} = 19 \%$$

4.1.2 Vyhodnocení orientačního výpočtu poklesu napětí na přípojnici rozvodného zařízení VS rozvodu BB při spouštění největšího spotřebiče

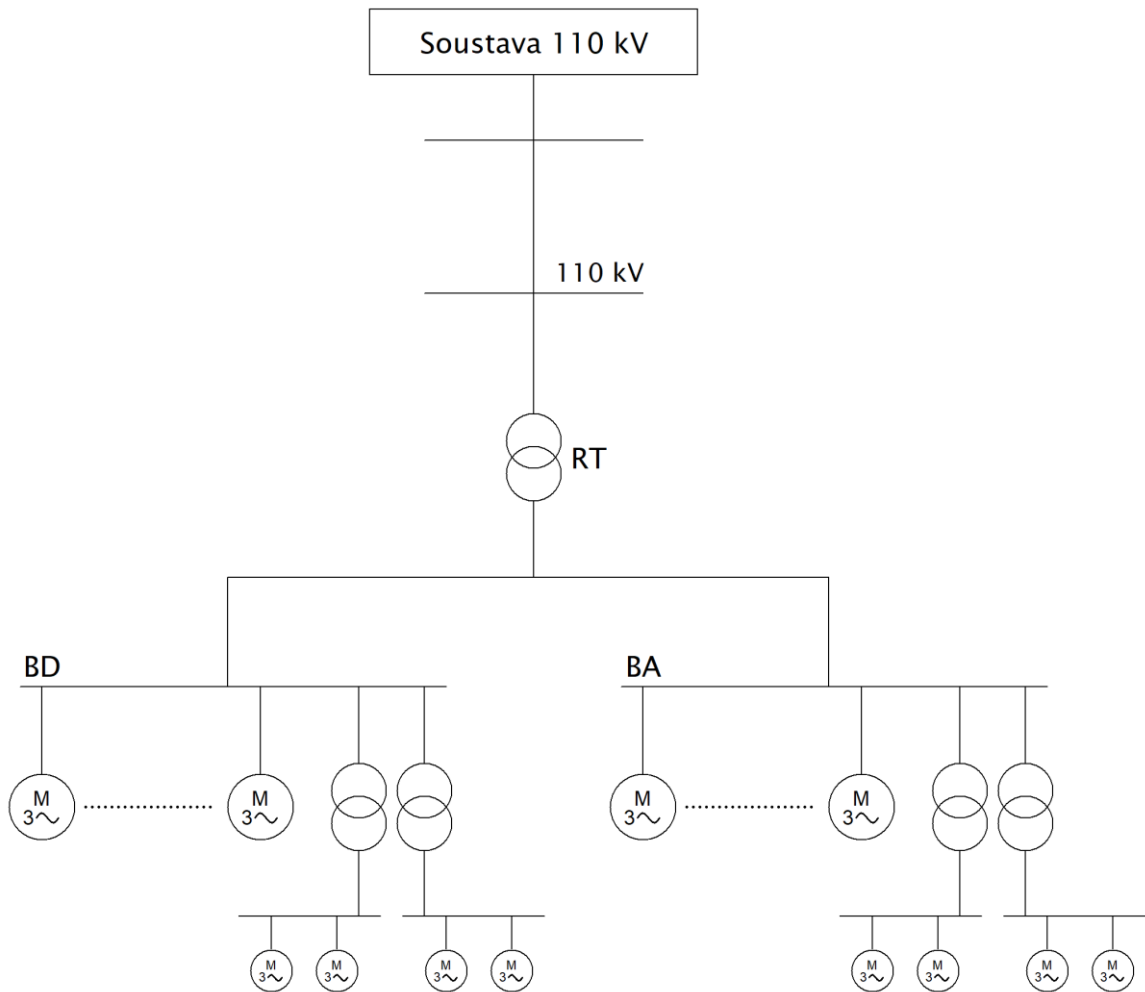
Z výsledného poklesu napětí Δu lze vyvodit, že sice nebyla splněna 1. podmínka dána normou ČSN 38 1120, ale byla dodržena 2. podmínka této normy (viz Kapitola 2.2.1). Vypočítaný pokles napětí vychází jako $\Delta u = 19 \%$, což je víc jak mezních 15 % definovaných normou.

Důležité je, že celkově napětí na svorkách elektromotorů napájených ze stejného rozváděče neklesne pod 80 % z U_n . Vzhledem ke krátké délce kabelů, pomocí kterých jsou elektromotory připojeny k rozváděči VS, bude úbytek napětí na kabelech rozhodně menší než 1 %. Celkově tak úbytek napětí nebude větší 20 % a bude splněna 2. podmínka normy ČSN 38 1120. Spouštění největšího spotřebiče CCHV na rozvodu BB by tedy nemělo omezit chod ostatních elektromotorů napájených ze stejného rozvodu.

4.2 Samonajždění skupiny pohonů

Při procesu samonajždění pohonů se uvažuje následující režim. Pracovní zdroj VS vypadne a dojde k záskoku na rezervní zdroj. VS je tak napájena z rozvodné soustavy 110 kV přes trojviňutový rezervní transformátor. Pro proces samonajždění se provádí kontrola poklesu napětí na svorkách spotřebičů VS napájených ze skupiny rozvodů buď BA a BD, nebo BC a BB, které jsou napájeny přes jakoby dva dvojviňutové transformátory, pro výpočet nahrazující RT, napájející současně danou dvojici rozvodů.

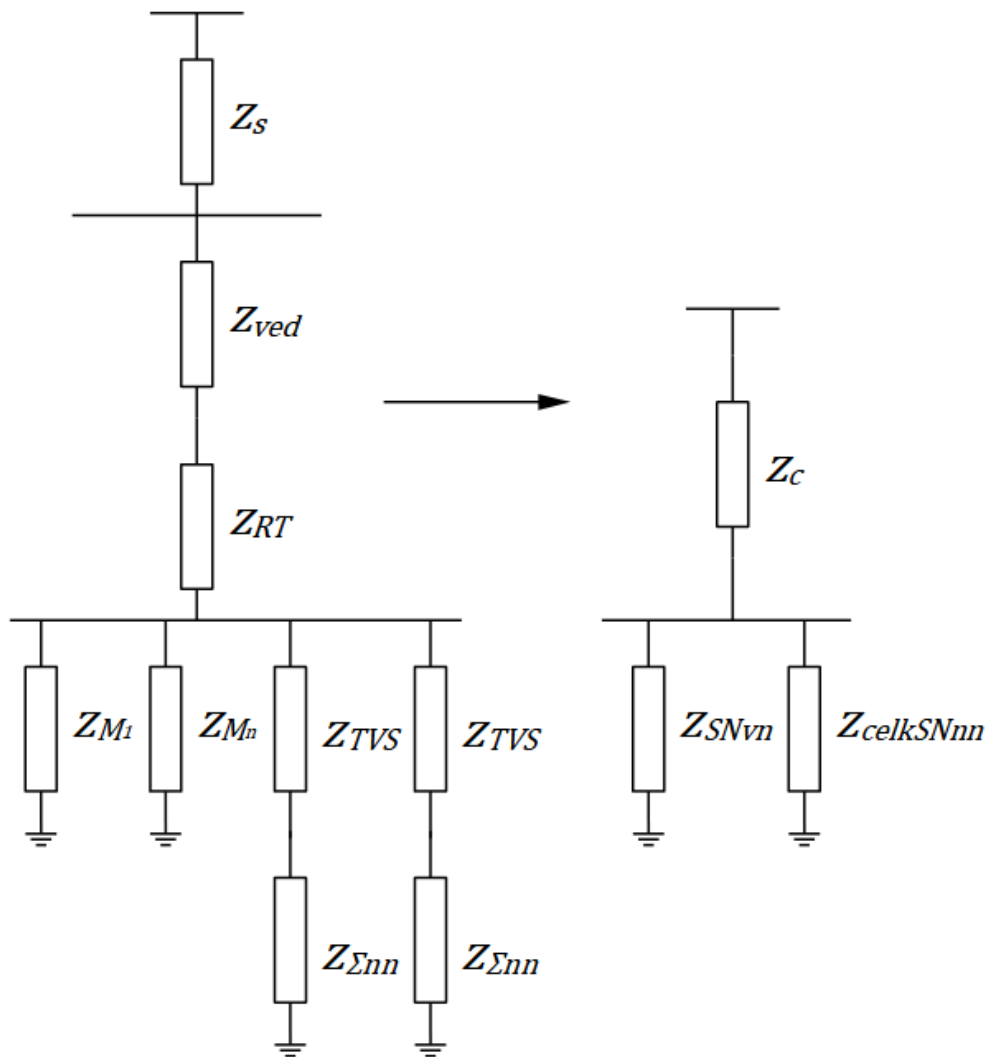
Pro výpočet byla vybrána skupina BA a BD, protože se zkoumá nejhorší možný případ samonajždění a skupina BA a BD vykazuje větší součtový výkon připojených pohonů než skupina BB a BC. Principiální elektrické schéma pro samonajždění je zakresleno na Obrázek 4.3. Kde jsou rozvody BA a BD napájeny ze soustavy 110 kV přes terciální vinutí RT, který je tedy při výpočtech nahrazen jako dvojviňutový.



Obrázek 4.3: Schéma samonajždění skupiny pohonů napájených přes RT

4.2.1 Výpočetní kontrola poklesu napětí na svorkách spotřebičů VS při samonajždění

Jako vztažné napětí je zvoleno jmenovité napětí rozvodu 6 kV tedy $U_v = 6$ kV a vztažný výkon představuje jmenovitý výkon RT $S_v = 31,5$ MVA. Výpočetní schéma je zobrazeno na Obrázek 4.4. Celkovou napájecí impedancí z_c představuje sériová kombinace impedance soustavy 110 kV z_s , impedance RT z_{RT} a impedance vedení mezi soustavou 110 kV a RT z_{ved} .



Obrázek 4.4: Výpočetní schéma samonajíždění přes RT

Výpočet impedance soustavy 110 kV:

$$z_s = x_s = \frac{U_s^2}{S_{ks}} \cdot \frac{S_V}{U_v^2} \cdot p_{ZT}^2 = \frac{110^2}{1905} \cdot \frac{31,5}{6^2} \cdot \left(\frac{6,3}{110}\right)^2 \cong 0,018 \text{ p.j.}$$

Výpočet impedance rezervního transformátoru 110/6,3 kV:

$$z_{RT} = x_{RT} = u_{k\%} \cdot \frac{U_{nRT}^2}{S_{nRT}} \cdot \frac{S_V}{U_v^2} \cdot p_{RT}^2 = 0,09 \cdot \frac{6,3^2}{31,5} \cdot \frac{31,5}{6^2} = 0,1 \text{ p.j.}$$

Výpočet impedance vedení mezi soustavou 110 kV a RT:

$$X_{ved} = x_{km} \cdot l = 0,4 \cdot 7,3 = 2,92 \Omega$$

$$R_{ved} = r_{km} \cdot l = 0,12 \cdot 7,3 \cong 0,88 \Omega$$

$$z_{ved} = \sqrt{R_{ved}^2 + X_{ved}^2} \cdot \frac{S_V}{U_v^2} \cdot p_{RT}^2 = \sqrt{0,88^2 + 2,92^2} \cdot \frac{31,5}{6^2} \cdot \frac{6,3^2}{110^2} = 0,009 \text{ p.j.}$$

Celková impedance napájecího systému:

$$z_c = z_{RT} + z_s + z_{ved} = 0,018 + 0,1 + 0,008 = 0,126 \text{ p. j.}$$

Impedance skupiny vn pohonů účastnících se samonajíždění je dána vztahem (2-9). Potřebné hodnoty záběrných proudů a zdánlivých příkonů vypočítaných z účinnosti a účinníku jsou uvedeny v Tabulka 4-3. Na základě technologického zadání je možné při samonajíždění vypnout následující pohony: 1 pohon LAC, 1 pohon CKO1 a 1 pohon CKO2.

Tabulka 4-3: Parametry vn pohonů účastnících se samonajíždění na rozvodech BD a BA potřebné pro výpočet reaktance samonajíždění s definovaným stavem zapnuto/vypnuto

Rozvod	Pohon	i_z (-)	P_n (MW)	$\cos\varphi$ (-)	η (-)	S_o (MVA)	Stav
BD	HCC	7,5	1,6	0,89	0,95	1,89	Z
BD	CKO1	5	0,2	0,87	0,944	0,24	Z
BD	CKO2	6	0,5	0,88	0,941	0,60	Z
BD	LAC	4,6	2,1	0,88	0,96	2,49	Z
BD	CCHV	5,9	4,8	0,82	0,955	6,13	Z
BA	HCC	7,5	1,6	0,89	0,95	1,89	Z
BA	HCC	7,5	1,6	0,89	0,95	1,89	Z
BA	CKO1	5	0,2	0,87	0,944	0,24	V
BA	CKO1	5	0,2	0,87	0,944	0,24	Z
BA	CKO2	6	0,5	0,88	0,941	0,60	V
BA	CKO2	6	0,5	0,88	0,941	0,60	Z
BA	LAC	4,6	2,1	0,88	0,96	2,49	Z
BA	LAC	4,6	2,1	0,88	0,96	2,49	V
BA	CTVN	5	0,2	0,9	0,944	0,24	Z

Výsledná impedance skupiny vn pohonů při samonajíždění tedy bude:

$$z_{SNvn} = x_{SN} = \frac{S_v}{\sum_{i=1}^n i_{z_i} \cdot S_{0_i}} \cong 0,28 \text{ p. j.}$$

Impedance skupiny nn pohonů se vypočítá obdobně, potřebné parametry pro výpočet jsou patrné z Tabulka 4-4.

Tabulka 4-4: Parametry nn pohonů účastnících se samonajíždění na rozvodech BD a BA potřebné pro výpočet reaktance samonajíždění

Pohon	U_n (kV)	P_n (MW)	$\cos\varphi$	η (-)	i_z (-)	S_o (MW)	Počet
Ekv. ventilátor	0,4	0,075	0,86	0,96	7	0,09	5
Ekv. čerpadlo	0,4	0,16	0,89	0,94	5,94	0,19	4

Výsledná impedance skupiny nn pohonů při samonajíždění pak je:

$$z_{SNnn} = x_{SNnn} = \frac{S_v}{\sum_{i=1}^n i_{z_i} \cdot S_{0_i}} \cdot \frac{S_v}{U_v^2} \cdot p_{RT}^2 \cong 3,7 \text{ p. j.}$$

Impedance transformátoru VS:

$$z_{TVS} = x_{TVS} = u_{k\%} \cdot \frac{U_{nTVS}^2}{S_{nTVS}} \frac{S_v}{U_v^2} = 0,063 \cdot \frac{6^2}{1,25} \frac{31,5}{6^2} \cong 1,59 \text{ p. j.}$$

Sériová kombinace impedance transformátoru a skupiny nn pohonů:

$$z_{nn} = z_{TVS} + z_{\Sigma nn} \cong 5,29 \text{ p. j.}$$

Celková impedance zařízení na rozvodně 0,4 kV při samonajždění:

$$z_{celkSNnn} = \frac{Z_{nn} \cdot Z_{nn}}{Z_{nn} + Z_{nn}} = \frac{5,3 \cdot 5,3}{5,3 + 5,3} \cong 2,64 \text{ p. j.}$$

Celková impedance VS při samonajždění:

$$z_{celkSN} = \frac{z_{celkSNnn} \cdot z_{SNvn}}{z_{SNvn} + z_{SNvn}} = \frac{2,6 \cdot 3,7}{2,6 + 3,7} = 0,253 \text{ p. j.}$$

Kontrolovaná hodnota napětí na svorkách spotřebičů se vypočítá ze získaných reaktancí dle vztahu (2-10):

$$u = \frac{z_{celkSN}}{z_c + z_{celkSN}} \cdot u_e = \frac{0,253}{0,126 + 0,253} \cdot 1 \cong 0,66 \text{ p. j.}$$

4.2.2 Vyhodnocení orientačního výpočtu při samonajždění skupiny pohonů

Poměrná velikost napětí na svorkách elektromotorů vychází jako $u = 0,66$ p. j. Napětí vyhovuje normě ČSN 38 1120, jelikož vychází více jak mezních 0,65 p. j. Dle orientačního výpočtu by tedy samonajždění pohonů napájených z rozvodu BB a BC přes RT ze sítě 110 kV mělo proběhnout v pořádku.

KAPITOLA 5: PODROBNÝ VÝPOČET POMOCÍ SIMULAČNÍHO PROGRAMU NEPLAN

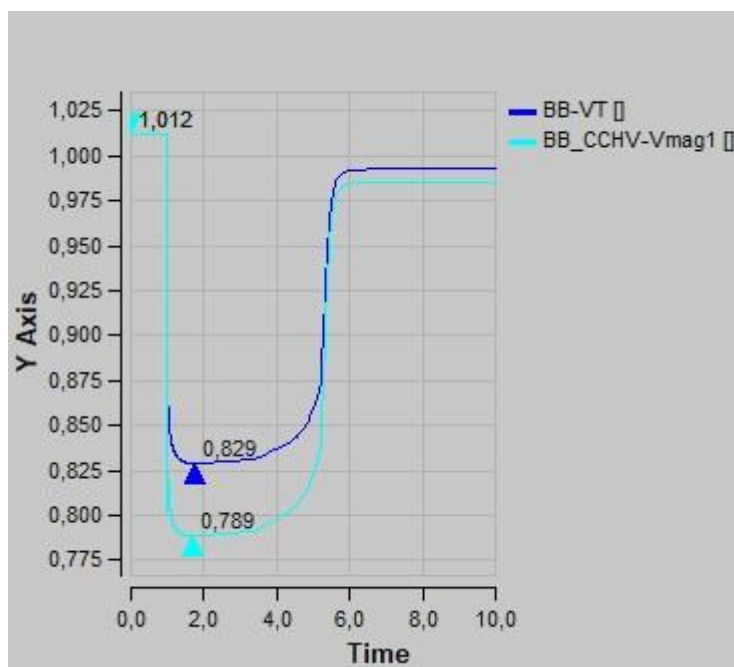
Simulace přechodových procesů je provedena v prostředí software *NEPLAN* pomocí modulu *Dynamic Analysis*. Tento modul slouží pro výpočty elektromechanických a elektromagnetických přechodových jevů ve zkoumané elektrické uzlové síti.

Před začátkem a po skončení simulace přechodového procesu je vždy proveden výpočet load flow zobrazující napěťové poměry a výkonové toky v jednotlivých uzlech namodelované sítě.

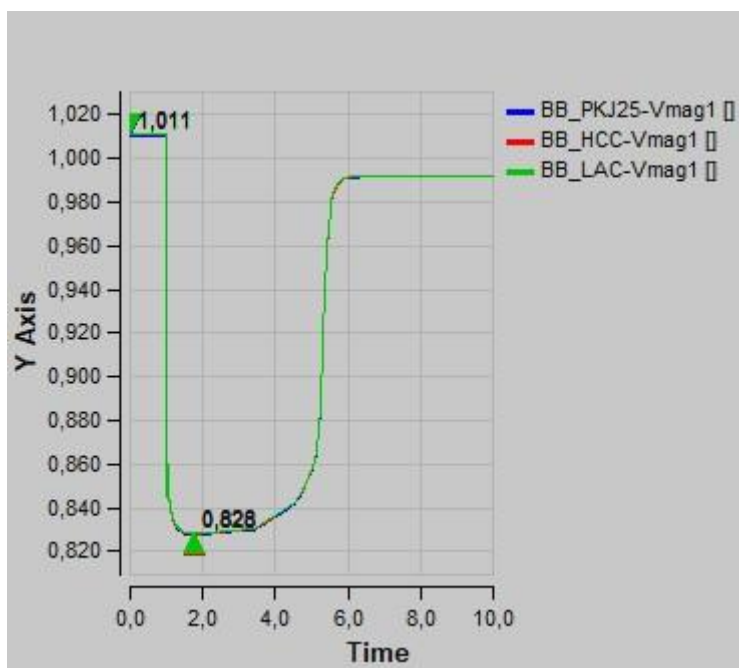
5.1 Spouštění největšího spotřebiče

Simulace spouštění největšího spotřebiče je uvažována stejně jako v případě zjednodušeného výpočtu. Největší elektromotor, čerpadlo chladící vody CCHV, připojený k rozvodně 6 kV BB se spouští napájecí cestou ze sítě 400 kV přes BT a OT. Pro simulaci je tedy motor CCHV nastavený ve výchozím stavu jako vypnutý, v čase 1 s dojde k jeho spouštění. Před spouštěním motoru bylo na rozvodně BB vyladěno napětí co nejlépe jmenovité hodnotě rozvodu VS 6 kV pomocí nastavení odbočky primárního vinutí OT. Velikost poměrného napětí se vztahuje k jmenovité hodnotě rozvodu VS, tedy $U_v = 6$ kV.

Průběh výsledného poměrného napětí v čase na rozvodně BB a na svorkách největšího elektromotoru CCHV je zaznamenán na Obrázek 5.1. Pro porovnání je na Obrázek 5.2 zakreslen průběh poměrného napětí na svorkách elektromotorů, které vykazují po CCHV největší výkon (HCC a LAC) a s nejdelším přívodním kabelem (PKJ).



Obrázek 5.1: Průběh poměrného napětí na rozvodně 6 kV BB a na svorkách elektromotoru při spouštění největšího spotřebiče



Obrázek 5.2: Průběh poměrného napětí na svorkách ostatních motorů s největším výkonem HCC, LAC a motoru s nejdelším přívodním kabelem PKJ

5.1.1 Vyhodnocení simulace spouštění největšího spotřebiče

Z výsledného poklesu napětí na rozvodně BB na Obrázek 5.1 je patrné, že byla vyhověna 2. podmínka normy ČSN 38 1120. Stejně jako v případě zjednodušeného výpočtu spouštění největšího spotřebiče sice vychází úbytek napětí na rozvodně více jak mezních 15 %, jak je patrné z Obrázek 5.1. Maximální úbytek na rozvodně vychází jako 82,8 %.

Důležité ale je, že nebude překročena hodnota pro celkový úbytek na svorkách elektromotorů 20 %. Tento předpoklad dokládá výsledný průběh napětí na svorkách ostatních motorů s největším výkonem a nejdelším přívodním kabelem zobrazený na Obrázek 5.2. Úbytek napětí na svorkách motoru nepřekročil hodnotu 20 %. Dle výsledků simulace tedy spouštění největšího spotřebiče vyhovuje normě ČSN 38 1120.

5.2 Simulace samonajíždění skupiny pohonů

Při simulaci samonajíždění skupiny pohonů je uvažována situace, kdy jsou spotřebiče připojené k rozvodnám VS 6 kV napájeny nejdříve přes OT a BT ze soustavy 400 kV, Následně dojde k přechodu na rezervní zdroj, napájení VS převezme soustava 110 kV přes RT. Z hlediska simulace přechodového procesu se provádí přechod na rezervní napájení v nastaveném čase, popsany v Kapitole 2.3.5. Nejprve dojde v čase 1 s k vypnutí vypínačů kabelů propojujících rozvodny VS s OT, posléze dojde v nastaveném čase 3 s k zapnutí vypínačů spojujících rozvodny VS s RT.

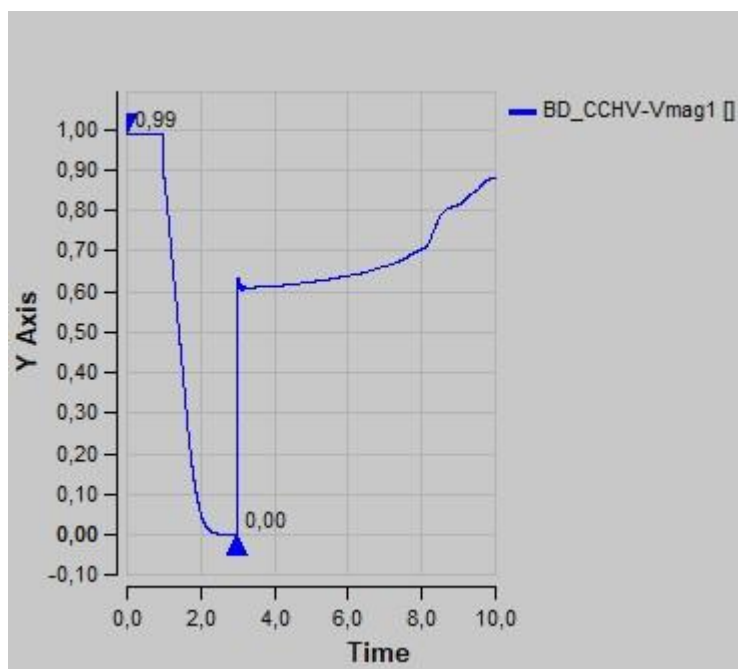
Před spuštěním simulace samonajíždění je napětí na rozvodnách 6 kV vyladěno pomocí nastavení odbočky primárního vinutí OT a RT. Transformátor je v chodu naprázdno, napětí se tedy bude blížit hodnotě 6,3 kV.

Norma ČSN 38 1120 udává podmínku na velikost napětí na svorkách elektromotorů. Podobně jako při zjednodušeném výpočtu je pro zhodnocení napěťových poměrů při samonajíždění zkoumán nejhorší možný případ samonajíždění. Proto byl zkoumán pokles napětí na svorkách motorů připojených k rozvodnám BA a BD (napájené ze sekundárního vinutí RT), neboť motory připojené na tyto rozvodny mají větší celkový výkon oproti motorům připojeným k rozvodnám BB a BC (napájené z terciálního vinutí RT).

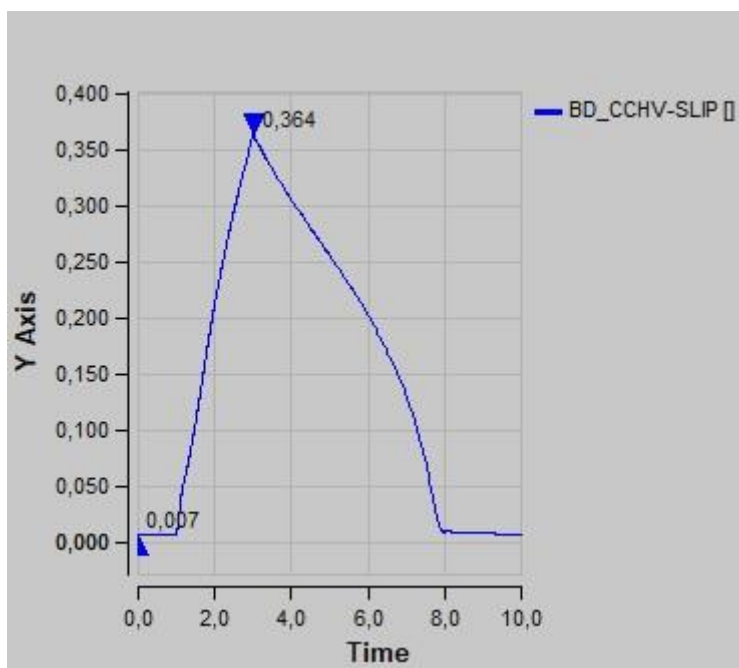
Pro znázornění poklesu napětí při samonajíždění byl proto vybrán průběh napětí na svorkách motoru s nejdelším přívodním kabelem. Na přípojnici rozvodny BD je připojen větší celkový příkon, než je na přípojnici rozvodny BA. Proto byl tedy vybrán pro demonstraci elektromotor připojený na BD oproti elektromotoru připojeném na BA. Je to tedy CCHV připojený na rozvod BD pomocí dvojice paralelních kabelů.

Výsledný průběh napětí svorkách motoru CCHV je pak znázorněn na Obrázek 5.3. Pro porovnání je uveden na Obrázek 5.5 průběh napětí na svorkách ostatních motorů majících po CCHV největší výkon, tj. HCC a LAC.

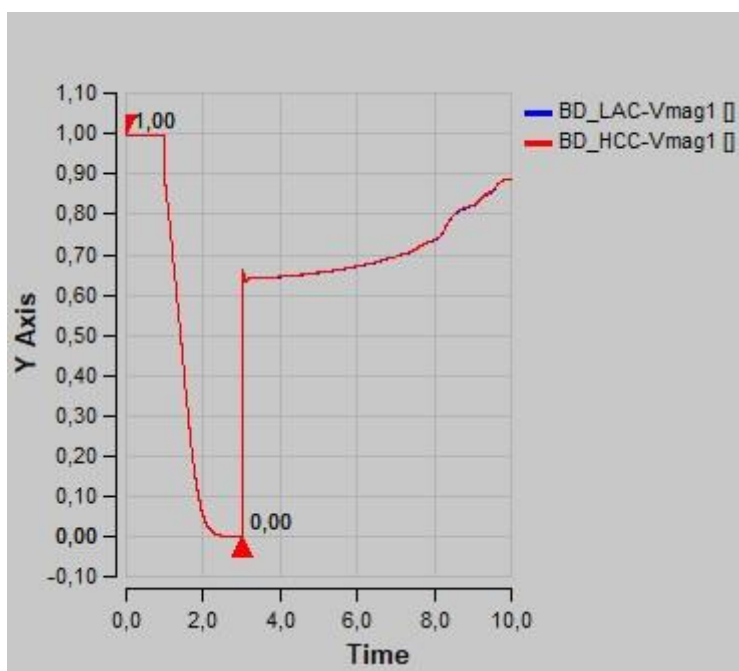
Za účelem prozkoumání rozběhu motorů byl vynesena průběh skluzu na největším motoru CCHV, výsledný průběh je na Obrázek 5.4. Dále jsou zaznamenány na Obrázek 5.6 průběhy skluzů motorů HCC a LAC pro porovnání s průběh skluzu největšího motoru. Napěťové poměry při přechodu na rezervní zdroj znázorňuje průběh napětí na jednotlivých rozvodnách VS na Obrázek 5.7.



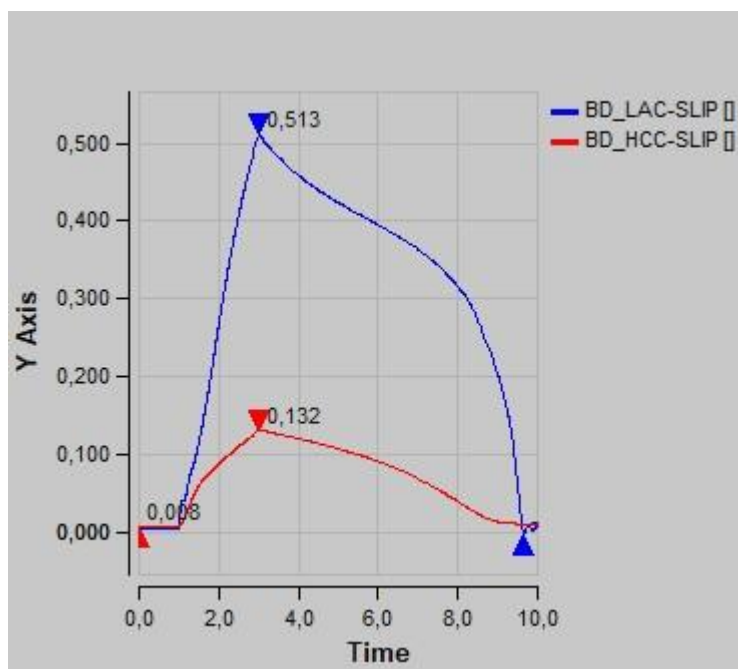
Obrázek 5.3: Průběh napětí na svorkách motoru s nejdelším přívodním kabelem CCHV připojeného na rozvodně BD při samonajíždění skupiny pohonů



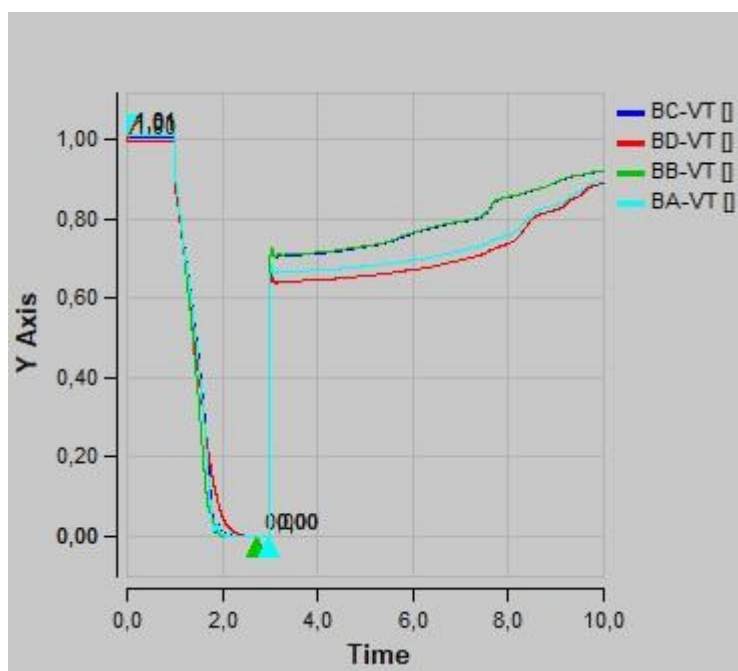
Obrázek 5.4: Průběh skluzu v čase největšího motoru CCHV připojeného na rozvodně BD při samonajíždění skupiny pohonů



Obrázek 5.5: Průběh napětí na svorkách motorů HCC a LAC připojených na rozvodně BD při samonajíždění skupiny pohonů



Obrázek 5.6: Průběh skluzu motorů HCC a LAC připojených na rozvodně BD při samonajíždění skupiny pohonů



Obrázek 5.7: Průběh poměrného napětí na rozvodnách VS 6 kV BA, BB, BC a BD při samonajíždění skupiny pohonů

5.2.1 Vyhodnocení simulace samonajíždění skupiny pohonů

Proces samonajíždění pohonů po přechodu na rezervní zdroj napájení VS v nastaveném čase 2 s od odpojení napájení z pracovního zdroje vyhovuje podmínkám normy ČSN

38 1120. Výsledek je doložitelný pro nejhorsí případ spouštění pohonu při samonajíždění, tj. spouštění motoru CCHV mající největší výkon a nejdelší přívodní kabel, který je napájen z rozvodny BD.

Z Obrázek 5.3 je patrné, že po přechodu na rezervní zdroj sice napětí na svorkách motoru CCHV nedosahuje hodnoty 65 % z U_n vlivem jeho velkého výkonu a dlouhé délky přívodního kabelu. Norma ale připouští větší pokles napětí, pokud se prokáže, že se pohon bezpečně rozběhne. Bezpečný rozběh pohonu CCHV vyplývá z průběhu skluzu na Obrázek 5.4, kdy v čase 5 s po přechodu na rezervní zdroj se pohon plynule rozbíhá. Pro srovnání je uveden na Obrázek 5.5 průběh napětí na svorkách motorů HCC a LAC, kde už výsledné napětí po přechodu na rezervní zdroj vychází více než 65 % z U_n . Plynulý rozběh těchto motorů dokládá i výsledný průběh skluzů na Obrázek 5.6.

Dle výsledků simulace tedy proces samonajíždění pohonů splňuje normu ČSN 38 1120 a rozběh skupiny pohonů po přechodu na rezervní zdroj napájení v nastaveném čase by měl proběhnout v pořádku.

ZÁVĚR

Zkoumané přechodové procesy spouštění největšího spotřebiče a samonajždění skupiny pohonů ve VS JE jsou vyhodnocovány dle požadavků daných normou ČSN 38 1120. Podmínky normy se vztahují na poměrnou velikost napětí na přípojnicích rozvodnů VS při rozboru spouštění jednotlivých pohonů, nebo na velikost napětí na svorkách elektromotorů při posouzení samonajždění.

Při výpočtech přechodových procesů se VS uvažuje jako uzlová elektrická síť, výchozí parametry pro výpočty jsou uvedeny v Kapitola 3: popisující uspořádání a zařízení VS studované JE. Výpočet je nejdříve proveden jako zjednodušený uvažující předpoklady popsané v Kapitole 2.2 a nahrazující jednotlivá zařízení pomocí impedancí. Provedení zjednodušeného výpočtu je uvedeno v Kapitola 4:. Následně je pro detailnější rozbor uskutečněn výpočet v prostředí simulačního software *NEPLAN*, způsob a výsledky simulace jsou zmíněny v Kapitola 5:.

Při spouštění největšího spotřebiče je uvažována situace, kdy je generátorový vypínač ve vypnutém stavu a napájení VS probíhá přes OT a BT z elektrické soustavy 400 kV, tedy přenosové soustavy. Pro zhodnocení napěťových poměrů byl vybrán nejhorší případ spouštění největšího motoru čerpadla chladící vody CCHV, kdy je tento motor připojen na rozvod BB vlastní spotřeby elektrárny.

Dle zjednodušeného výpočtu (Kapitola 4.1.1) sice vychází výsledný pokles napětí na přípojnicích rozvodny 6 kV jako $\Delta u = 19 \%$, což je víc jak 15 % definovaných v 1. podmínce normy. Pro proces spouštění největšího spotřebiče je ale nejdůležitější celková velikost napětí na svorkách ostatních elektromotorů, ta nesmí vycházet více jak 20 %. Při zjednodušujícím výpočtu se napětí na rozvodně rovná napětí na svorkách elektromotorů, jelikož se zanedbávají délky přívodních kabelů elektromotorů, vychází tedy jako $\Delta u = 19 \%$ a 2. podmínka normy ČSN 38 1120 je splněna.

Vliv přívodních kabelů na velikost napětí na svorkách elektromotorů a dodržení 2. podmínky normy ČSN 38 1120 je pak detailněji prozkoumán při simulačním výpočtu. Z výsledného průběhu napětí na svorkách elektromotorů na Obrázek 5.2 je zřejmé, že celkový pokles napětí není větší než 20 % z U_n . Jmenované výsledky výpočtů tedy prokazují, že napěťové poměry při spouštění největšího spotřebiče vyhovují normě ČSN 38 1120.

Samonajždění skupiny pohonů je myšleno, že probíhá po přechodu na rezervní zdroj napájení VS, který představuje elektrická soustava 110 kV napájející VS přes RT, v nastaveném čase. Obdobně jako při výpočtech spouštění největšího spotřebiče se pro zhodnocení uvažuje nejhorší případ, proto je zkoumáno samonajždění na rozvodech BD a BA, kde je největší instalovaný příkon elektromotorů.

Zjednodušený výpočet stanovuje výsledné poměrné napětí na $u = 66 \%$, to je více jak 65 % daných normou. Stejně jako při výpočtu spouštění největšího spotřebiče jsou ale zanedbány úbytky napětí na přívodních kabelech k elektromotorům. Norma vysloveně

udává podmínku na velikost napětí na svorkách elektromotorů. Proto je při simulačním výpočtu prozkoumáno napětí na svorkách motoru mající největší úbytek napětí na přívodním kabelu. Je to tedy motor CCHV, který má největší výkon a nejdelší přívodní kabel.

Výsledný průběh je na Obrázek 5.3, velikost poměrného napětí na svorkách motoru po přechodu na rezervní sice vychází méně jak 65 % z U_n . Norma ale připouští větší pokles, pokud je prokázán bezpečný rozběh motoru. Plynulý rozběh motoru je doložen na průběhu skluzu motoru na Obrázek 5.4. Pro porovnání je na Obrázek 5.5 uveden průběh napětí svorkách motorů HCC a LAC, který už vychází více jak 65 %.

Z uvedených výsledků je zřejmé, že samonajíždění splňuje podmínky normy ČSN 38 1120 a bude probíhat úspěšně, jelikož se pohony plynule rozběhnou a nedojde k jejich zabrzdění.

LITERATURA

- [1] TROJÁNEK, Zdeněk, Josef HÁJEK a Pavol KVASNICA. *Přechodné jevy v elektrizačních soustavách*. Praha: SNTL, 1987.
- [2] GRAINGER, John J. a William D. STEVENSON. *Power System Analysis*. McGraw-Hill Education, 1994. ISBN 0070612935.
- [3] Load Flow Analysis of a Five-Bus Power System. *Maplesoft* [online]. 2021 [cit. 2023-02-08]. Dostupné z: <https://www.maplesoft.com/Applications/Detail.aspx?id=154675>
- [4] Gauss Seidel Method. *EEEGUIDE: Online Electrical and Electronics Study* [online]. [cit. 2023-01-06]. Dostupné z: <https://www.eeeguide.com/gauss-seidel-method/>
- [5] Raphson Method for Load Flow Analysis. *EEEGUIDE: Online Electrical and Electronics Study* [online]. [cit. 2023-01-06]. Dostupné z: <https://www.eeeguide.com/newton-raphson-method-for-load-flow-analysis/>
- [6] KEYHANI, A. Study of Fast Decoupled Load Flow Algorithms with Substantially Reduced Memory Requirements. *Electric Power Systems Research* [online]. 1985, (1), Strany 1-9 [cit. 2023-01-06]. ISSN 0378-7796. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/0378-7796\(85\)90050-1](https://doi.org/10.1016/0378-7796(85)90050-1)
- [7] GLOVER, J. Duncan, Mulukutla S. SARMA a Thomas J. OVERBYE. *Power System Analysis and Design*. 4. vydání. CL Engineering, 2007. ISBN 0-534-54884-9.
- [8] ČESKÁ REPUBLIKA. *Zákon č. 263/2016: o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření (atomový zákon)*, ročník 2016. Dostupné také z: https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/legislativa/263_2016_AZ_20220201_01.pdf
- [9] ČESKÁ REPUBLIKA. *Vyhláška č. 329/2017: o požadavcích na projekt jaderného zařízení*. In: *Sbírka zákonů č. 329/2017*. Česká republika, ročník 2017, částka 112. Dostupné také z: https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/legislativa/vyhlasky/329_2017.pdf
- [10] ŠPETLÍK, Jan. Učební text předmětu Elektrárny: Schéma napájení vlastní spotřeby. [Intranet ČVUT FEL].
- [11] DOLEŽAL, Jaroslav, Jiří ŠŤASTNÝ, Jan ŠPETLÍK, Stanislav BOUČEK a Zbyněk BRETTSCHEIDER. *Jaderné a klasické elektrárny* [online]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011 [cit. 2023-02-08]. ISBN 978-80-01-04936-5. Dostupné z: <https://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/cvut-1-elektrarny.pdf>
- [12] ONDRÁŠEK, Milan. *Elektrárny II*. 2. vydání. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1988.
- [13] ČSN 38 1120: Vlastní spotřeba tepelných elektráren a tepláren. Únor 1994. Český normalizační institut.
- [14] ČSN 34 1610: Elektrický silnoproudý rozvod v průmyslových provozovnách. Český normalizační institut, 1963.
- [15] BECKWITH, T. R. a W. G. HARTMANN, *Motor bus transfer: considerations & methods*, IEEE Systems Technical Conference on Industrial and Commercial Power 2005., Saragota Springs, NY, USA, 2005, strana 62-76, doi: 10.1109/ICPS.2005.1436358.
- [16] Motor Bus Transfer Zones. In: *BECKWITH ELECTRIC* [online]. [cit. 2023-03-16]. Dostupné z: <https://beckwithelectric.com/motor-bus-transfer/>
- [17] HUNSWADKAR, Girish a N.R. VIJU. *Considerations and Methods for an Effective Fast Bus Transfer System* [online]. 2010 [cit. 2023-05-02]. Dostupné z: https://www.erlphase.com/downloads/papers/CBIP2010_Considerations_And_Methods_For_Effective_FBT.pdf

PŘÍLOHA A: SEZNAM ZKRATEK

BT	blokový transformátor
JE	jaderná elektrárna
OT	odbočkový transformátor
RT	rezervní transformátor
TCHVN	technická voda nedůležitá
VS	vlastní spotřeba

PŘÍLOHA B: ELEKTRICKÉ SCHÉMA ZKOUMANÉ JADERNÉ ELEKTRÁRNY

Přiloženo ve formátu A3.

