

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektroenergetiky

Bakalářská práce

**Návrh vlastní spotřeby JE s ohledem na bezpečné
přepnutí na záložní napájení**

Karel Kovařík

2019

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kovařík** Jméno: **Karel** Osobní číslo: **459936**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektroenergetiky**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Návrh vlastní spotřeby JE z ohledem na bezpečné přepnutí na záložní napájení.

Název bakalářské práce anglicky:

Design of NPP's own power consumption for safe switching to backup power.

Pokyny pro vypracování:

1. Vlastní spotřeba elektráren (schémata, spolehlivost, požadavky ...)
2. Specifika vlastní spotřeby jaderných elektráren
3. Problematika přechodu VS na záložní napájení, podmínky.
4. Způsoby spolehlivého zajištění přechodu na záložní napájení.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Doležal J a kol.: Jaderné a klasické elektrárny, ČVUT v Praze 2011, ISBN 978-80-01-04936-5
[2] Dočekal A., Bouček S.: Elektrárny II, Skripta ČVUT v Praze 1998, ISBN 80-01-01279-4
[3] Vlastní spotřeba tepelných elektráren a tepláren, ČSN 38 1120, 1994

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Stanislav Bouček, katedra elektroenergetiky FEL

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

Datum zadání bakalářské práce: **15.02.2018** Termín odevzdání bakalářské práce: **24.05.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2019**

Ing. Stanislav Bouček
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Čestné prohlášení

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

V Praze dne 23. 5. 2019

.....

Podpis

Poděkování

Děkuji vedoucímu práce Ing. Stanislavu Boučkovi za čas, ochotu a cenné rady, které mi pomohly k vypracování této práce. Zároveň bych rád poděkoval své rodině za bezmeznou trpělivost a poskytnutou podporu.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá energetickými systémy ve vlastní spotřebě jaderné elektrárny s tlakovodním reaktorem. V úvodní části jsou přehledně shrnuty údaje o zastoupení jednotlivých typů jaderných reaktorů provozovaných ve světě a situace v ČR. Dále jsou popsány základní prvky vlastní spotřeby a zásady jejich návrhu v konvenčních i jaderných elektrárnách. Samostatní kapitola je věnována způsobům bezpečného přechodu vlastní spotřeby z pracovního na záložní napájení. Poslední část práce je věnována výpočtům zkratových a napěťových poměrů ve vlastní spotřebě a návrhu vhodného přístrojového vybavení.

Klíčová slova

Jaderná elektrárna, návrh vlastní spotřeby, elektrické napájecí zdroje, nouzové napájecí zdroje, automatický záskok rozvodny

Abstract

This bachelor thesis deals with energy systems in the own consumption of a nuclear power plant with a pressurized light-water moderated and cooled reactor. The introductory part summarizes the data on the representation of the various types of nuclear reactors operated in the world and the situation in the Czech Republic. The basic elements of own consumption and the principles of their design in conventional and nuclear power plants are described below. The separate chapter is devoted to the ways of safe transition of self-consumption from work to backup power. The last part of the work is devoted to calculations of short-circuit and voltage ratios in own consumption and the design of suitable instrumentation.

Key words

Nuclear power plant, auxiliary power system design, electrical power supplies, emergency power systems, motor bus transfer

Obsah

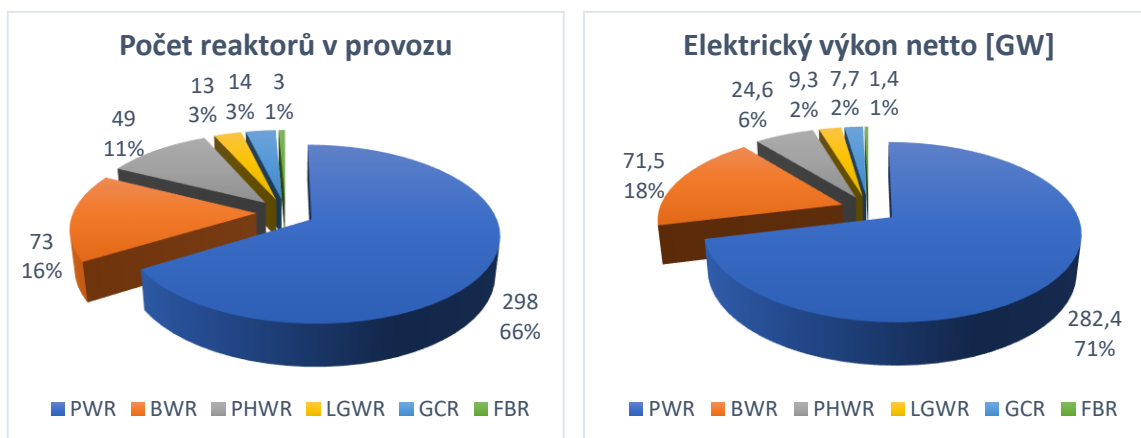
| | |
|--|----|
| 1. Úvod..... | 14 |
| 1.1 Elektrická energie v ČR..... | 15 |
| 2. Elektrická část elektráren | 19 |
| 2.1 Elektrické schéma elektrárny | 19 |
| 2.2 Vlastní spotřeba elektrárny | 20 |
| 2.3 Zásady návrhu schématu VS elektrárny..... | 20 |
| 2.4 Provozní stavy VS | 21 |
| 2.5 Zdroje napájení VS | 21 |
| 2.6 Volba napěťové hladiny VS | 23 |
| 2.7 Výpočet velikosti zdrojů pro VS | 23 |
| 3. Specifika VS jaderné elektrárny..... | 25 |
| 3.1 Legislativní a technické požadavky na jaderná zařízení | 25 |
| 3.2 Kategorie bezpečnostních funkcí, bezpečnostní třídy | 26 |
| 3.3 Požadavky na elektrické napájecí systémy | 28 |
| 3.4 Další předpisy důležité pro návrh vlastní spotřeby jaderné elektrárny | 31 |
| 3.5 Rozdělení napájecích systémů dle požadavků IAEA..... | 32 |
| 3.6 Požadavky na nouzové napájecí zdroje pro případ ztráty vnějšího napájení 34 | |
| 3.7 Návrh napájecích zdrojů systémů I&C..... | 35 |
| 3.8 Ochrana do hloubky | 36 |
| 4. Problematika přechodu VS na záložní napájení..... | 38 |
| 4.1 Příčiny přechodu VS na záložní napájení..... | 38 |
| 4.2 Způsoby přechodu na záložní napájení..... | 39 |
| 4.3 Rychlé přepnutí..... | 41 |
| 4.4 Přepnutí „ve fázi“ | 41 |
| 4.5 Přepnutí na základě podpětí | 42 |
| 4.6 Přepnutí v pevně nastaveném čase..... | 43 |
| 4.7 Režimy sepnutí vypínače rezervního zdroje | 43 |
| 4.7.1 Sekvenční režim..... | 43 |
| 4.7.2 Simultánní režim | 43 |
| 4.8 Volba záskokových systémů | 44 |
| 5. Výpočet VS JE | 45 |
| 5.1 Výchozí údaje | 45 |
| 5.2 Volba napěťové hladiny rozveden vn | 45 |

| | | |
|-------|---|----|
| 5.3 | Volba odbočkových a rezervních transformátorů..... | 45 |
| 5.4 | Volba pohonů..... | 46 |
| 5.5 | Výpočet zkratových poměrů | 48 |
| 5.5.1 | Výpočet zkratových poměrů při napájení VS z pracovního zdroje..... | 49 |
| 5.5.2 | Vnitřní napětí zdrojů..... | 50 |
| 5.5.3 | Určení reaktancí jednotlivých prvků | 50 |
| 5.5.4 | Zjednodušení náhradního schématu | 53 |
| 5.5.5 | Určení zkratových proudů | 54 |
| 5.5.6 | Výpočet zkratových poměrů při napájení VS z rezervního zdroje | 55 |
| 5.6 | Kontrola navržených zdrojů při samonajíždění skupiny elektromotorů | 56 |
| 5.6.1 | Samonajíždění při napájení přes odbočkový transformátor:..... | 57 |
| 5.6.2 | Samonajíždění při napájení přes rezervní transformátor:..... | 58 |
| 5.7 | Kontrola zkratovým výkonem..... | 58 |
| 5.8 | Spouštění největšího spotřebiče ve vlastní spotřebě..... | 59 |
| 5.8.1 | Kontrola úbytku napětí na přípojnicích VS při spouštění největšího spotřebiče přes OT | 59 |
| 5.8.2 | Kontrola úbytku napětí na přípojnicích VS při spouštění největšího spotřebiče přes RT | 59 |
| 6. | Návrh rozvodného zařízení a vypínačů vlastní spotřeby | 61 |
| 7. | Závěr..... | 62 |
| 8. | Seznam literatury | 63 |
| 9. | Seznam použitých zkratk..... | 64 |

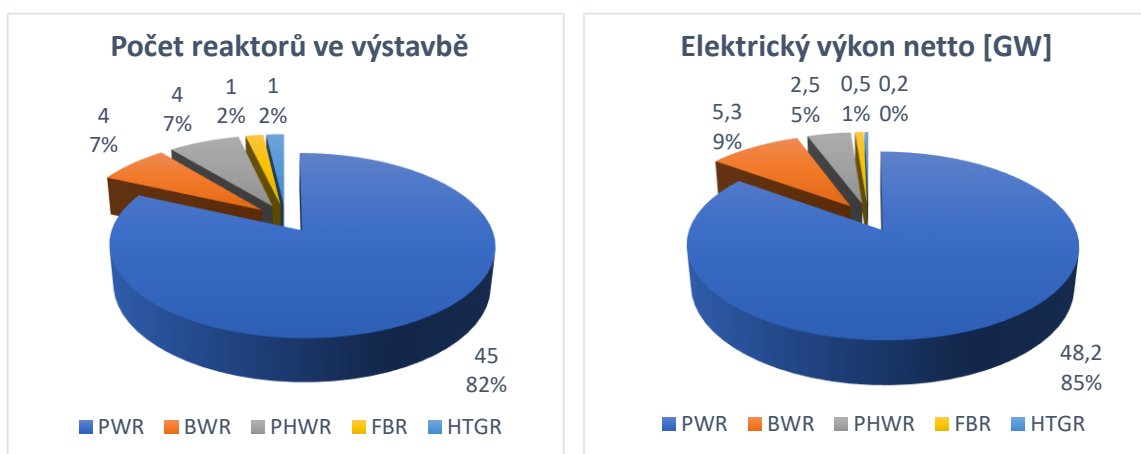
1. Úvod

Jaderná energetika ve světě prochází v současnosti bouřlivým vývojem. Na jedné straně se zejména v asijských zemích prudce rozvíjí, na druhé straně ve vyspělých zemích západní Evropy dochází k její stagnaci nebo utlumování.

K 30. 4. 2019 bylo ve světě v provozu celkem 450 jaderných reaktorů s celkovým čistým elektrickým výkonem 396,9 GW. Z toho tvořilo 66 % reaktorů tlakovodních s podílem na elektrickém výkonu 71 %. V různých fázích výstavby bylo k tomuto datu dalších 55 reaktorů s celkovým elektrickým výkonem 56,6 GW. Z nich bylo opět nejvíce reaktorů tlakovodních (83 %) s podílem na elektrickém výkonu 85 %, následují reaktory BWR a PHWR s podílem na elektrickém výkonu 9 % a 5 %. Zastoupení jednotlivých typů reaktorů a jejich čistý elektrický výkon je znázorněn na Obr.1 . a Obr.2 . [11] Plánovaných reaktorů bylo k 31. 12. 2017 celkem 82 s podílem PWR 81 %, BWR 11 %, FBR 6 % a PHWR 2 %. [9]



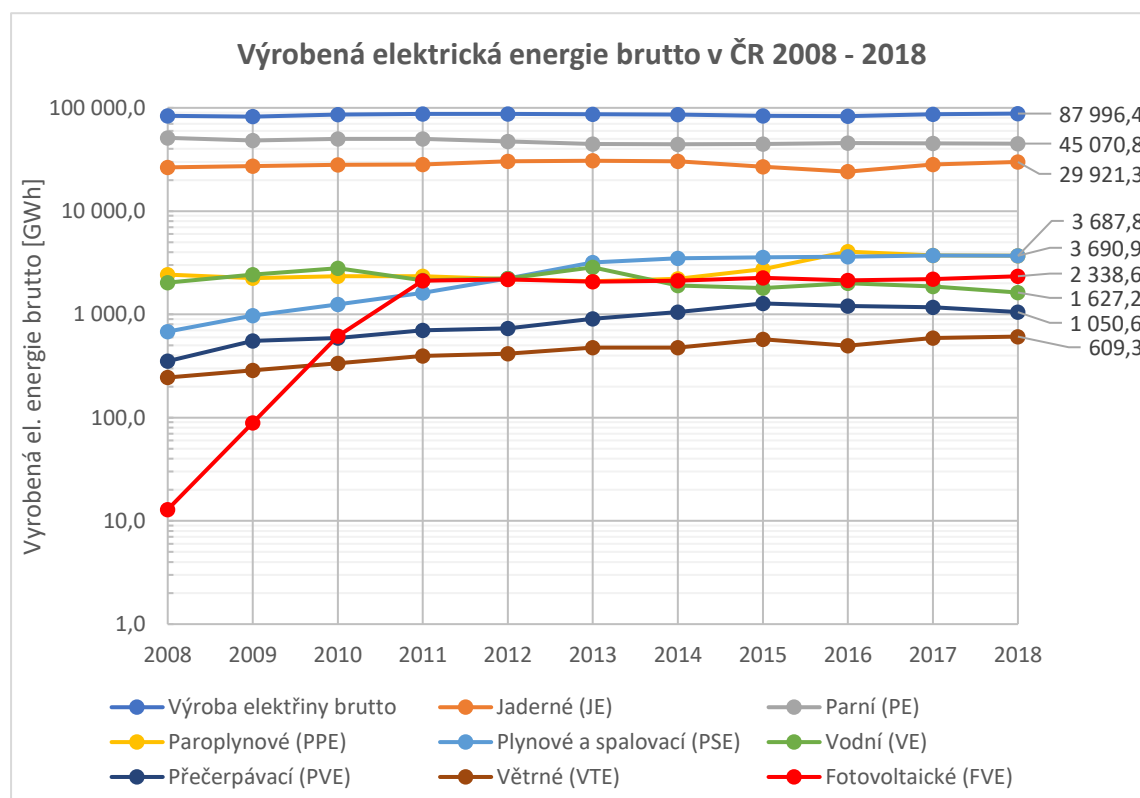
Obr. 1 Počet reaktorů v provozu k 30. 4. 2019 [Pris]



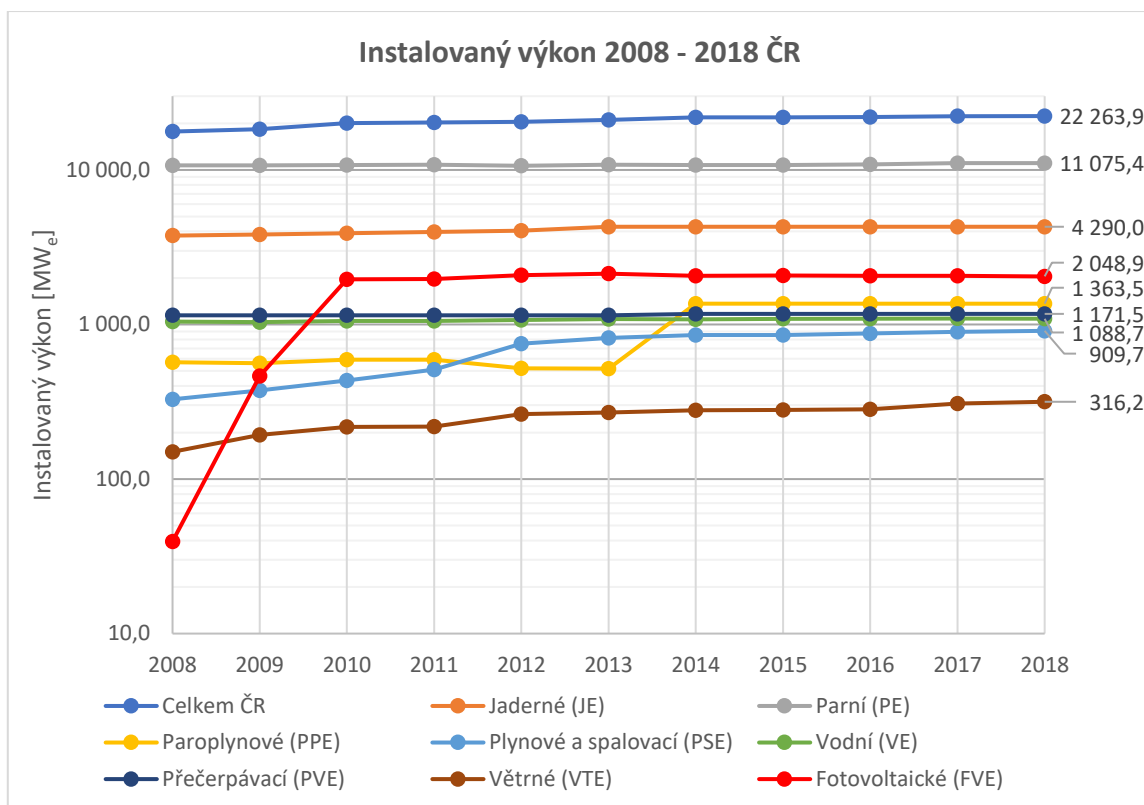
Obr. 2 Počet reaktorů ve výstavbě k 30. 4. 2019 [11]

1.1 Elektrická energie v ČR

Aktuální i historická data o výrobě a spotřebě el. energie v ČR podávají pravidelné zprávy ERÚ o provozu ES. Na Obr. 3 a Obr. 4 je znázorněn vývoj hrubé výroby el. energie a instalovaného výkonu v letech 2008 – 2018 s uvedením jednotlivých typů zdrojů. Podíl JE na celkové výrobě elektřiny se v uvedeném období pohyboval přibližně mezi 29 – 35 %, v ČR tedy zajišťují přibližně 1/3 hrubé výroby elektrické energie. Podíl JE na celkovém instalovaném výkonu mírně klesl z 21,2 % v roce 2008 na dnešních 19,3 %.



Obr. 3 Výroba elektrické energie ČR 2008 – 2018 [6]

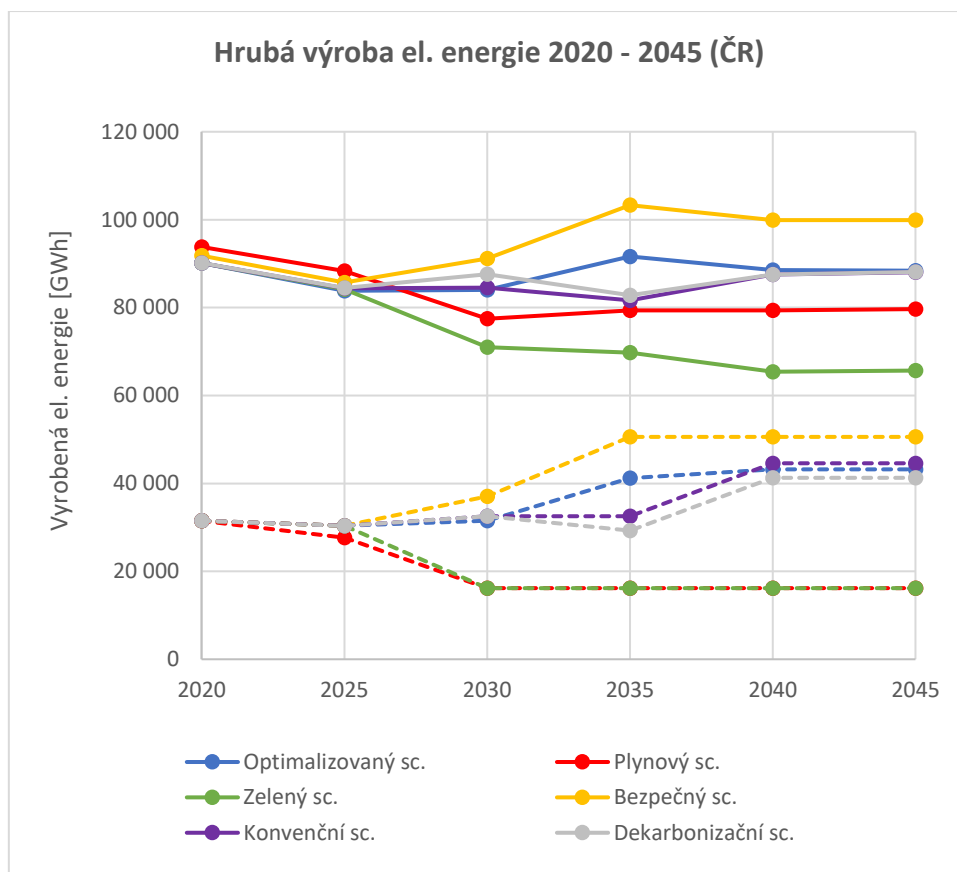


Obr. 4 Instalovaný výkon ČR 2008 – 2018 [6]

Pro popis odhadu budoucího vývoje lze vycházet z několika dalších zdrojů. Základním z nich je Státní energetická koncepce ČR z roku 2015 společně s Doplňujícím analytickým materiálem k návrhu aktualizace Státní energetické koncepce, které předkládají šest možných scénářů vývoje v období let 2020 – 2045. Jedná se o následující scénáře:

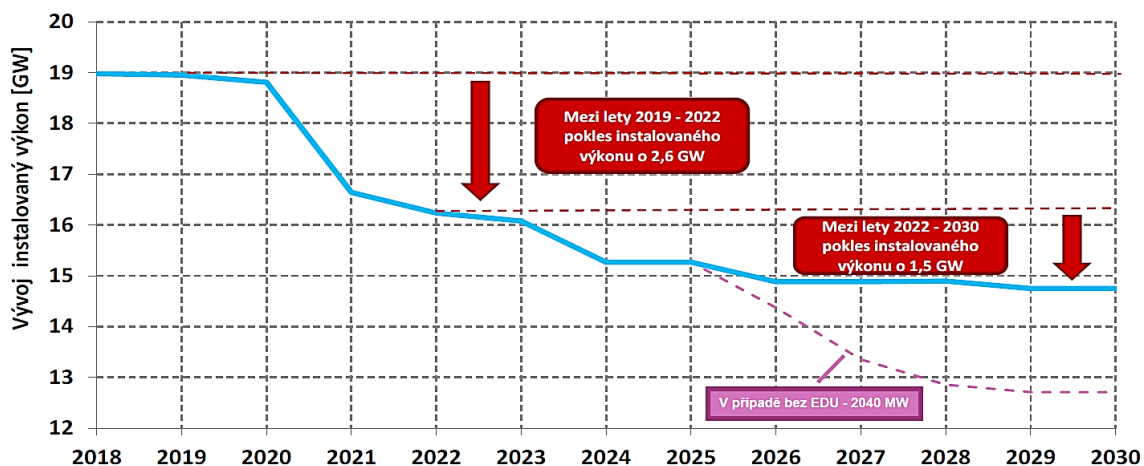
- Optimalizovaný scénář
- Plynový scénář s omezenou energetickou soběstačností
- Zelený scénář s omezenou energetickou soběstačností
- Bezpečný a soběstačný scénář
- Konvenční ekonomický scénář
- Dekarbonizační scénář

Vývoj hrubé výroby elektrické energie v GWh dle jednotlivých scénářů je zobrazen na Obr. 5 (celková výroba plnou čarou, čárkovaně jaderné zdroje). Vzhledem k zaměření práce nebudu jednotlivé scénáře blíže popisovat, bližší údaje lze nalézt v [12].



Obr. 5 Hrubá výroba el. energie ČR 2020 - 2045 [12]

V ČR se v současné době nepřipravuje výstavba žádného nového systémového zdroje, který by mohl být připojen k ES v období do roku 2030. Ve střednědobém horizontu lze tedy veškerý rozvoj zdrojové základny očekávat pouze na úrovni OZE a decentrálních zdrojů el. energie. S postupným odstavováním uhelných elektráren se v období 2019 – 2022 předpokládá pokles instalovaného výkonu systémových zdrojů o 2,6 GW a dále pokračování poklesu o dalších 1,5 GW do roku 2030. Předpokládaný vývoj je zobrazen na Obr. 6. [7]



Obr. 6. Vývoj instalovaného výkonu ES ČR (včetně zdrojů do 10 MWe), vyjma OZE. [7]

V současnosti se zdá, že existuje konsensus mezi odbornou veřejností na podpoře dalšího rozvoje jaderné energetiky v ČR.

Osobně se domnívám, že stavba nového jaderného bloku bude v budoucnosti potřebná pro zajištění dostatku elektrické energie, zejména v souvislosti s rozvíjející se elektromobilitou.

Cílem této práce je popsat rámcově požadavky důležité pro návrh vlastní spotřeby jaderné elektrárny, a to zejména v kontextu aktuálního atomového zákona a relevantních národních i mezinárodních standardů. Dalším, neméně důležitým cílem, je poskytnout přehled způsobů převedení napájení vlastní spotřeby z pracovních na rezervní zdroje napájení.

2. Elektrická část elektráren

Základním úkolem elektrické části elektráren je spolehlivé vyvedení výkonu elektrárny do elektrizační soustavy a zároveň zajistit spolehlivý a hospodárný provoz elektrické části elektrárny při všech jejích provozních stavech. [4] [5] Návrh koncepce elektrické části elektrárny vychází z technickoekonomických rozborů respektujících použité technologie a důležitost elektrárny v elektrizační soustavě. [5]

2.1 Elektrické schéma elektrárny

V rámci projektování elektrického schématu elektrárny je nutné stanovit a navrhnout:

- Výkon a počet
 - bloků
 - alternátorů
 - blokových, odbočkových a rezervních transformátorů
- Spotřebiče vlastní spotřeby
- Způsob zajištění napájení vlastní spotřeby pro
 - standardní provozní stavy
 - nestandardní provozní stavy
- Způsob vyvedení výkonu [5]

Standardním uspořádáním elektráren v současnosti je blokové uspořádání s parogenerátorem, turbínou a elektrickým generátorem v jednom bloku.

Elektrická část elektráren zahrnuje tyto skupiny zařízení:

- Rozvodny
- Elektrické stroje
 - Generátory a jejich budicí soustavy
 - blokové transformátory a transformátory vlastní spotřeby
 - elektrické motory vn a nn
- elektrické přístroje (např. elektrické ochrany, vypínače a odpojovače) a měřicí přístroje
- spojovací prvky (kabelová a venkovní vedení, zapouzdřené vodiče, přípojnice, uzemnění)
- systémy kontroly a řízení
- pomocné provozy a zařízení

Pro návrh schémat elektrické části elektrárny platí tyto hlavní požadavky:

- zajištění spolehlivého a bezpečného provozu, pro které jsou charakteristické tyto rysy:
 - zálohovatelnost napájení pro zařízení VS
 - zálohovatelnost při vyvedení výkonu
 - bezpečnost při manipulacích, údržbě a revizích
 - schopnost najetí ze tmy nebo ostrovního provozu
 - schopnost bezpečného odstavení elektrárny
- zajištění požadavku operativnosti
- zajištění ekonomičnosti návrhu a provozu

Dalšími faktory, které je nutno při návrhu zohlednit jsou například:

- mohutnost elektrizační soustavy, do které má elektrárna pracovat,
- provozní pravidla a zvyklosti
- vzdálenost a schéma rozvodného zařízení od elektrárny
- požadavky na najíždění, provozní a poruchové odstavení bloku [5]

2.2 Vlastní spotřeba elektrárny

Vlastní spotřeba elektrárny je elektrická energie potřebná pro zajištění činnosti hlavních výrobních zařízení při výrobě elektřiny včetně pomocných provozů, které se na její výrobě přímo podílejí. Do vlastní spotřeby se zahrnují i ztráty těchto zařízení a ztráty v rozvodech. Spotřeba ve vedlejších provozech a nevýrobních objektech se do vlastní spotřeby nezahrnuje, považuje se za elektřinu dodanou a zahrnuje se do odběrů elektrárny. Vlastní spotřeba se zpravidla uvádí v průměru v MWh pro celou elektrárnu za rok, nebo v % vyrobené elektrické energie. [4] V případě jaderných elektráren činí vlastní spotřeba přibližně 5–8 % hrubé vyrobené elektrické energie. [5]

Za elektrická zařízení vlastní spotřeby považujeme výrobní a rozvodná zařízení instalovaná v elektrárně. [2] Tato zařízení se rovněž podílejí na zajištění řídicích, kontrolních a ochranných funkcí elektrárny.

2.3 Zásady návrhu schématu VS elektrárny

Schéma napájení vlastní spotřeby má být, pokud možno, jednoduché a maximálně přehledné, přičemž musí být zajištěn provoz strojně technologických zařízení VS ve všech předpokládaných provozních kombinacích jejich chodu. Schéma vyvedení výkonu musí být navrženo podle požadavků sítě, do které se vyvádí výkon. [2]

Schéma hlavního rozvodu VS elektrárny se volí podle velikosti elektrárny, zapojení strojně technologických zařízení, způsobu práce elektrárny a rozsahu VS. Při jeho návrhu je účelné provést spolehlivostní analýzu možných variant. [2]

Transformátory se volí tak, aby se zabezpečilo nejmenších možných zkratových výkonů.

Rozvod musí být vybaven spínacími a ochrannými zařízeními.

Rozvod musí být navržen tak, aby se v případě poruchy dalo pomocí vypínačů zamezit havárii a zabezpečit chod elektrárny [5].

2.4 Provozní stavy VS

Provozní stavy VS rozlišujeme na:

- 1) ustálený trvalý chod VS, kdy se zapínají a vypínají pouze jednotlivé menší spotřebiče,
- 2) přechodový stav VS, kdy
 - a) její část, nebo jednotlivý velký pohon dobíhá
 - b) se její část, nebo jednotlivý velký pohon spouští,
 - c) probíhá samonajíždění, tzn. že se její část, nebo celá VS skupinově rozbíhá po krátké ztrátě napájecího napětí,
 - d) probíhá opětovné najíždění pohonů, při kterém se skupina pohonů rozbíhá po ukončení samonajíždění a následném samočinném zapnutí jejich vypínačů za daný časový interval. [2]

2.5 Zdroje napájení VS

Zdroje VS elektrárny musí ve všech normálních provozních stavech i při stavech poruchových zabezpečit dodávku elektrické energie požadované kvantity a kvality pro zařízení VS. [5]

Protože spolehlivost provozu každé elektrárny je přímo závislá na spolehlivosti zařízení vlastní spotřeby, je napájení vlastní spotřeby zajišťováno několika rozličnými zdroji. Zdroje vlastní spotřeby elektrárny slouží pro napájení motorů a jiných spotřebičů zapojených do technologického procesu výroby energie, napájení dalších pohonů a spotřebičů a zajišťovacích pohonů. Tyto zdroje se dělí na najížděcí, pracovní, rezervní, doběhové a nouzové. [2]

Najížděcí zdroj slouží pro uvedení elektrárny do chodu z úplného klidu. [2] Ve většině případů se jako najížděcí zdroj používá elektrizační soustava prostřednictvím záložního transformátoru, nebo blokového a odbočkového transformátoru, pokud je možné odpojit od soustavy alternátor najížděného bloku. Ve zvláštních případech, technicky

a ekonomicky zdůvodněných, lze jako najížděcí zdroj použít i jiné zdroje, například diesel generátor, či vodní elektrárnu. Najížděcí zdroj se navrhuje na předpokládanou dobu provozu vyplývající z jeho užití. [4] [5]

Pracovní zdroj vlastní spotřeby zajišťuje napájení rozvodu vlastní spotřeby při normálním provozu elektrárny. Nejčastěji se jako pracovní zdroj používá generátor bloku prostřednictvím odbočkového transformátoru. Pracovní zdroj je navrhován pro dlouhodobý provoz. [5]

Záložní zdroj (rezervní zdroj) je určen pro zajištění dodávky elektrické energie pro vlastní spotřebu při poruše pracovního zdroje. Nejčastěji se jako záložní zdroj používá elektrizační soustava prostřednictvím záložního transformátoru. [J&K elektrárny] Lze použít i odbočku sousedního bloku. Rezervní zdroje se navrhují na předpokládané výkony a doby provozu potřebné pro napájení vlastní spotřeby, nebo její části při poruchách pracovních zdrojů. [2]

Doběhový zdroj je určen pro uvedení elektrárny do úplného klidu při normálních i poruchových stavech. Nejčastěji se jako doběhový zdroj používá elektrizační soustava prostřednictvím záložního transformátoru. Pro zajištění spolehlivého doběhu v případě ztráty napětí na svorkách záložního transformátoru (porucha v soustavě, porucha transformátoru) se používají akumulátorové baterie s rotačními měniči, nebo střídači a alternátory poháněné vznětovým motorem, nebo spalovací turbínou. Doběhový zdroj se navrhuje na předpokládanou dobu provozu vyplývající z jeho užití. [4] [5]

Nouzové zdroje jsou takové zdroje, které zajišťují doběh elektrárny do klidu při poruše pracovního a záložního zdroje. Nouzové zdroje slouží pro napájení spotřebičů, které zajišťují odvrácení vážného ohrožení osob, uchování důležitých informací a ovládání důležitých částí elektrárny. [2] Volba nouzových zdrojů závisí na druhu napájení (AC, DC) a na požadavcích na kontinuitu napájení spotřebičů VS. Jako nouzové zdroje pro spotřebiče vyžadující napájení bez přerušení dodávky elektrické energie lze použít rozváděč DC napětí napájený z akumulátorových baterií, střídač napájený z rozvodu DC napětí, nebo zdroj UPS napájený z rozvodu AC napětí. Spotřebiče, u kterých se připouští krátkodobé přerušení napájení, se mohou samostatně nebo skupinově, v předem určeném pořadí a čase, připojovat k rozvodu napájenému z diesel generátoru po jeho spuštění. Dle potřeb konkrétního schématu VS lze kombinovat všechny výše uvedené způsoby nouzového napájení.

Pokud je určitý zdroj navržen pro více funkcí (např. rezervní zdroj plní současně funkci doběhového zdroje), musí být navržen alespoň podle požadavků náročnějšího použití.

2.6 Volba napěťové hladiny VS

Zařízení vlastní spotřeby lze napájet elektrickým proudem různých napěťových hladin.

Pro vn rozvod VS se používá 3fázová síť s izolovaným uzlem s kmitočtem 50 Hz o doporučené napěťové hladině 10 kV nebo 6 kV. Volba provozu uzlu je závislá na rozsahu a zapojení elektrické rozvodné sítě VS, připojených spotřebičích, požadované spolehlivosti i na místních podmínkách. [2]

Pro nn rozvod VS se používá 3fázová soustava o napětí 400 V s přímo uzemněným uzlem, nebo soustava s napětím 690 V, i zde se doporučuje přímé uzemnění uzlu zdroje. Ve zvlášť odůvodněných případech lze použít i soustavy o jiném jmenovitém napětí, nebo s jiným způsobem provozu uzlu (případně bez jeho vyvedení). [2]

Rozhodujícím faktorem pro volbu napěťové hladiny VS je příkon elektrických pohonů, protože s růstem příkonu rostou energetické ztráty v rozvodu. Snížení těchto ztrát a úbytků napětí v rozvodu je možné realizovat použitím vyššího provozního napětí. [4]

Pro pohony pracující s konstantními otáčkami nebo vybavenými říditelnými převodovkami s 3fázovými asynchronními motory se doporučují tyto napěťové hladiny:

- 400 V pro motory do 250 kW
- 690 V do 500 kW
- 6 kV od 250 kW do cca 8 MW
- 10 kV od 500 kW výše [2] [4]

Pro stejnosměrný rozvod nn VS se přednostně používá soustava o napětí 220 V s oběma póly izolovanými. Pro stejnosměrný rozvod mn se volí napěťová soustava dle požadavků spotřebičů. Napětí ovládacích obvodů se volí dle použitého systému řízení a ovládání. [2]

2.7 Výpočet velikosti zdrojů pro VS

Při výpočtu velikosti zdroje pro napájení spotřebičů vlastní spotřeby se počítá s činným a jalovým výkonem, se ztrátami v rozvodu a transformátorech a se ztrátami elektrických pohonů a zařízení, které jsou v chodu při maximálním výkonu hlavního technologického zařízení. Zdroj musí být navržen s ohledem na:

- a) krátkodobou přetížitelnost zdrojů
- b) velikost zkratových proudů a výkonů s přihlédnutím k napěťovým poměrům a s ohledem k volbě přístrojů
- c) napěťové poměry. Napětí na přípojnicích vlastní spotřeby elektrické energie nemá za normálního provozu při spouštění jednotlivých pohonů

poklesnout pod $0,85 U_n$ a nesmí poklesnout pod $0,8 U_n$. Při poruchách, při nichž se uplatní samonajíždění, nesmí napětí poklesnout pod $0,65 U_n$.

Při nesplnění těchto podmínek se mohou provést tato opatření:

- zvýšení výkonu transformátoru
 - použití transformátoru s nižší reaktancí
 - technologicky nedůležité spotřebiče se najíždí později
- d) funkci ochran zdroje, především nadproudových ochran při dlouhotrvajícím rozběhu některých spotřebičů vlastní spotřeby při samonajíždění.

3. Specifika VS jaderné elektrárny

Vlastní spotřeba jaderných elektráren se od klasických elektráren liší v několika ohledech.

Současné jaderné elektrárny s tlakovodními reaktory pracují především v základní části denního diagramu. Důvodem jsou nepříznivé vlivy rychlých změn teploty s dopadem na životnost zařízení primárního okruhu, především nádoby reaktoru, palivových článků a kazet, potrubí a armatur. Z tohoto důvodu je nutné zajistit, aby pokud možno nedocházelo ke skokovým změnám výkonu reaktoru nebo dokonce k jeho náhlému odstavení. To klade zvýšené nároky na spolehlivost vlastní spotřeby a vyvedení výkonu do ES. [4] [5]

Pro vyvedení výkonu jaderných elektráren v ČR je elektrizační soustava navrhována a provozována tak, aby vyhověla přísnějšímu spolehlivostnímu kritériu N-2. Rovněž v případě poruchy typu blackout v přenosové soustavě ČR má obnova napájení VS JE nejvyšší prioritu. [5]

Další zásadní odlišností jaderných elektráren od ostatních typů je, že součástí jejich VS jsou také zařízení, která se podílejí na zajištění jaderné bezpečnosti. Jadernou bezpečností se rozumí

„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.“ [15]

Přímý vliv na jadernou bezpečnost má i spolehlivost provozování JE, ta přitom bezprostředně závisí na řešení elektrického schématu JE. Správný návrh tohoto schématu včetně schématu VS je tedy pro zajištění jaderné bezpečnosti mimořádně důležitý. [13]

Při návrhu VS JE lze vycházet ze stejných zásad jako při návrhu VS parních elektráren. Schéma VS JE závisí na typu jaderného reaktoru, počtu turboalternátorů a blokových transformátorů na reaktor, počtu parogenerátorů a oběhových čerpadel. Dále je nutné zohlednit výkon potřebný pro dochlazování reaktoru v případě jeho odstavení, které musí být zajištěno i při poruše pracovního a rezervního zdroje. [4] Konkrétní dopady do schématu VS mají i požadavky legislativních předpisů, např. požadavky na elektrické napájecí systémy uvedené ve vyhlášce SÚJB 329/2017 Sb.

3.1 Legislativní a technické požadavky na jaderná zařízení

Základní rámec bezpečného využívání jaderné energie, včetně výstavby a provozu jaderných elektráren, stanovuje zákon č. 263/2016 Sb., atomový zákon a jeho prováděcí vyhlášky. Pro návrh VS jaderné elektrárny je nejdůležitější vyhláška SÚJB č. 329/2017

Sb., o požadavcích na projekt jaderného zařízení. Před nabytím účinnosti nového atomového zákona řešil tuto problematiku zákon č. 18/1997 Sb.

3.2 Kategorie bezpečnostních funkcí, bezpečnostní třídy

Dříve platná legislativa definovala pro jaderná zařízení, jejichž součástí je tlakovodní reaktor, tzv. vybraná zařízení, která byla zařazena a rozdělena do bezpečnostních tříd 1, 2 a 3.

Současně platná legislativa zavádí nově pro jaderná zařízení s jaderným reaktorem kategorizaci bezpečnostních funkcí. Bezpečnostní funkce je taková činnost systému, konstrukce, komponenty nebo jiné součásti jaderného zařízení, která je významná pro zajišťování jaderné bezpečnosti jaderného zařízení.

Vybrané zařízení je vyhláškou SÚJB č. 329/2017 Sb. nově definováno jako systém, konstrukce, komponenta nebo jiná součást jaderného zařízení, které mají vliv na jadernou bezpečnost a na plnění bezpečnostních funkcí. Vyhláška zařazuje vybraná zařízení do bezpečnostních tříd podle kategorie bezpečnostní funkce, kterou plní.

Projekt jaderného zařízení musí stanovit, které komponenty, části nebo díly vybraného zařízení jsou důležité pro plnění bezpečnostní funkce, a provést jejich zařazení do bezpečnostních tříd.

Kategorizace bezpečnostních funkcí a zařazení vybraných zařízení do bezpečnostních tříd má vliv na provedení a volbu elektrických napájecích systémů ve VS JE, proto je v následujícím textu stručně shrnu.

Bezpečnostní funkce jsou rozděleny do tří kategorií:

Bezpečnostní funkce kategorie I: pasivní funkce systému, konstrukce nebo komponenty tlakové hranice primárního okruhu

Bezpečnostní funkce kategorie II: bezpečnostní funkce s nejvyššími požadavky na spolehlivost

Bezpečnostní funkce kategorie III: bezpečnostní funkce, které jsou při dosahování stejného bezpečnostního cíle nahraditelné projektovými opatřeními

Do bezpečnostní třídy 1 jsou zařazena vybraná zařízení plnící bezpečnostní funkce kategorie I. Nemusí sem být zařazena vybraná zařízení patřící do tlakové hranice primárního okruhu, jejichž poškození nevede k potřebě zásahu bezpečnostních systémů.

Do bezpečnostní třídy 2 jsou zařazena vybraná zařízení plnící bezpečnostní funkce kategorie II. Jsou to zařízení plnící pasivní funkci systému, konstrukce nebo komponenty, kterými jsou fyzické bariéry a vybraná zařízení se zaručenou vysokou spolehlivostí plnění aktivní bezpečnostní funkce bezpečnostních systémů.

Vybranými zařízeními bezpečnostní třídy 2 jsou například:

- pokrytí jaderného paliva,
- části tlakové hranice primárního okruhu, které nenáleží do bezpečnostní třídy 1, kromě těch vybraných zařízení, jejichž poškození nevede k potřebě zásahu bezpečnostních systémů,
- hermetická obálka,
- součásti bezpečnostního systému plnící ve vyhláškou definovaných stavech (zejména při abnormálním provozu, havarijních podmínkách a při nehodách) funkci:
 - rychlého odstavení jaderného reaktoru,
 - udržení dostatečného množství chladiva pro uchlazení aktivní zóny,
 - zajištění odvodu tepla a zbytkového tepla z aktivní zóny,
 - zajištění dodávky energií nebo řízení provozu vybraných zařízení bezpečnostní třídy 2,
 - ochranného nebo informačního systému kontroly a řízení.

Do bezpečnostní třídy 3 jsou zařazena vybraná zařízení nezařazená do bezpečnostní třídy 1 nebo 2, plnící bezpečnostní funkce kategorie III.

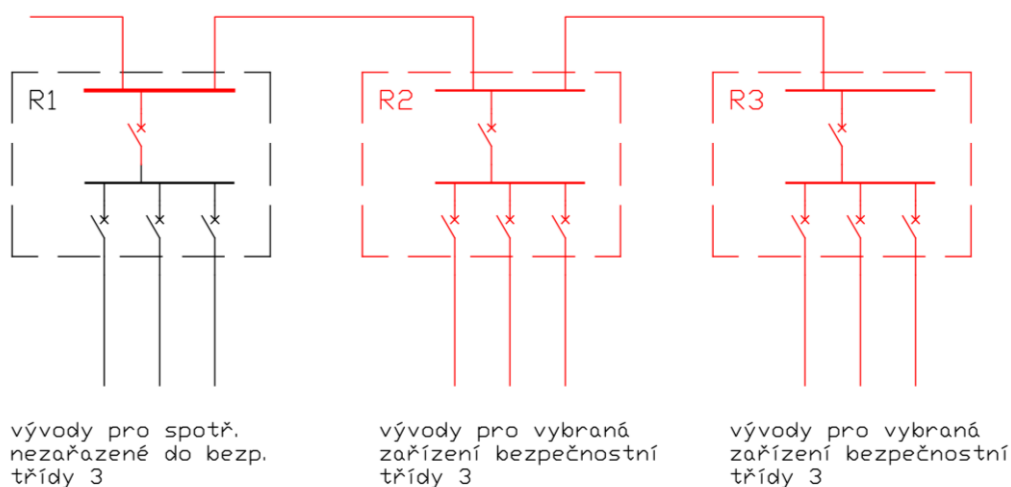
- Vybraná zařízení bezpečnostní třídy 3 jsou zařízení plnící ve vyhláškou definovaných stavech například tyto bezpečnostní funkce:
 - pro zabránění nepřijatelným změnám reaktivity,
 - pro udržení jaderného reaktoru ve stabilizovaném podkritickém stavu po jeho odstavení,
 - udržení dostatečného množství chladiva pro uchlazení aktivní zóny při provozních stavech,
 - zajištění dodávky energií nebo řízení provozu vybraných zařízení bezpečnostní třídy 3,
 - systémů kontroly a řízení.

Doplňující kritéria pro zařazení vybraných zařízení do bezpečnostních tříd:

- Elektrická zařízení systémů nouzového napájení, ze kterých jsou napájena vybraná zařízení zařazená do bezpečnostní třídy 2, jsou vybranými zařízeními

zařazenými do bezpečnostní třídy 2. Z těchto elektrických zařízení mohou být napájena rovněž vybraná zařízení vyžadující napájení a ovládání v bezpečnostní třídě 3 nebo zařízení bez požadavků na elektrické napájení a ovládání z vybraných zařízení, je-li zajištěna ochrana napájených vybraných zařízení bezpečnostní třídy 2 před důsledky jejich poruchy.

- Elektrická zařízení systémů nouzového napájení, ze kterých jsou napájeny spotřebiče vyžadující napájení a ovládání z vybraných zařízení zařazených do bezpečnostní třídy 3, jsou vybranými zařízeními zařazenými do bezpečnostní třídy 3.
- Přívodní jistič u rozvaděčů zapojených ve smyčce s dalšími rozvaděči, které jsou vybranými zařízeními zařazenými do bezpečnostní třídy 3, v jejichž vývodech není spotřebič vyžadující napájení z vybraných zařízení, je vybraným zařízením zařazeným do bezpečnostní třídy 3. Kabeláž sloužící pro zajištění funkce vybraného zařízení je vybraným zařízením zařazeným do stejné bezpečnostní třídy jako vybrané zařízení, pro které je určena. Ilustrace tohoto požadavku je zobrazena na Obr. 7.



Obr. 7

3.3 Požadavky na elektrické napájecí systémy

Systémy důležité pro provoz JZ musí být napájeny systémem navzájem nezávislých zdrojů elektrické energie dostatečné spolehlivosti a kapacity, tak aby bylo zajištěno jejich spolehlivé napájení. Navzájem se zálohující bezpečnostní systémy a zařízení musí být nezávislé i z hlediska elektrického napájení. Systém napájecích zdrojů musí být navržen tak, aby porucha rozvodu el. energie mimo jaderné zařízení nemohla ovlivnit:

- systém pracovního napájení JZ,

- systém rezervního napájení vlastní spotřeby JZ
- plnění základních bezpečnostních funkcí.

Pro napájení systémů a zařízení s vlivem na jadernou bezpečnost musí být k dispozici nezávislý nouzový zdroj elektrického napájení, který je rychle dostupný, spolehlivý a za provozu testovatelný, s dostatečným výkonem. Tento nouzový zdroj musí být schopen plnit svou bezpečnostní funkci při jednoduché poruše v systému nouzových zdrojů elektrického napájení a současně ztrátě vnějšího elektrického napájení. Zatěžování tohoto zdroje musí probíhat řízeným způsobem připojováním jednotlivých spotřebičů, aby nedošlo k jeho přetížení.

Pokud je počet nezávislých nouzových zdrojů elektrického napájení nižší, než je počet nezávislých zálohujících se bezpečnostních systémů stejného typu, nesmí být snížena spolehlivost a nezávislost zásahu bezpečnostních systémů.

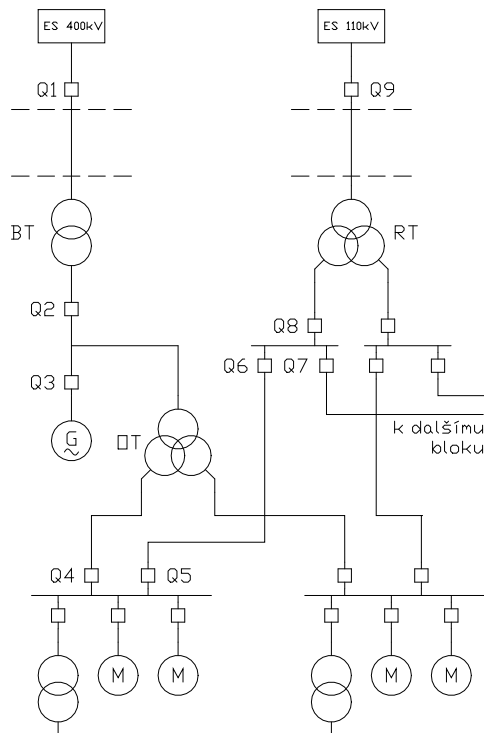
Kromě toho musí být k dispozici další diverzní a alternativní zdroje el. energie zajišťující napájení systémů a zařízení pro zvládnutí zvláštních situací.

Projekt dále musí určit systémy a zařízení s vlivem na jadernou bezpečnost, u nichž je nutné pro zajištění jaderné bezpečnosti nepřetržité napájení z akumulátorů. Kapacita akumulátorů pak má být stanovena konzervativním přístupem, tak aby byly zajištěny bezpečnostní funkce JZ do doby, než bude možné zajistit opětovné dobíjení akumulátorů.

Systém elektrického napájení sloužící pro napájení systémů a zařízení důležitých pro jadernou bezpečnost musí být vybaven monitorovacími a řídicími systémy, které podávají obsluze informace o důležitých parametrech napájecího systému a jsou schopny zjišťovat a lokalizovat jeho poruchy.

V případě JZ s reaktorem o tepelném výkonu větším než 50 MW, které slouží k výrobě el. energie, musí být rovněž možné napájet VS JZ z vlastního turbogenerátoru, pokud je napájení z vnější sítě přerušeno a je znemožněno vyvedení výkonu turbogenerátoru do vnější sítě. [14]

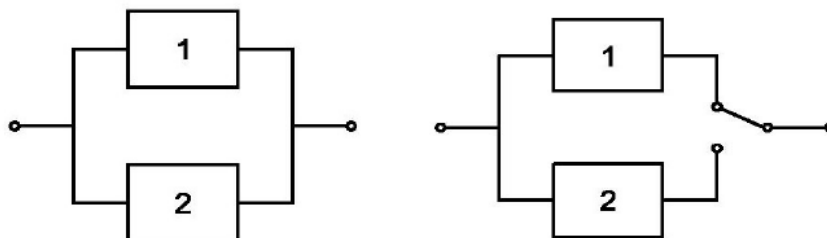
Posledně uvedený požadavek povede pravděpodobně k nutnosti instalace druhého generátorového vypínače umístěným mezi sekundárním vinutím BT a odbočkou k OT. V ideovém návrhu VS s ním proto uvažují. Základní návrh VS po zahrnutí tohoto vypínače je zobrazen na Obr. 8, kde je uvedený vypínač označen číslem 02.



Obr. 8

Pro úplné pochopení výše uvedených požadavků na elektrické napájecí systémy jsou zvláště důležité tyto pojmy:

Redundance (zálohování) – použití více prostředků, než je nezbytně nutné, pro zajištění požadované funkce. Jedná se o důležitý princip pro zabezpečení vysoké spolehlivosti systémů důležitých pro bezpečnost a pro splnění kritéria jednoduché poruchy. Redundance znamená, že v případě poruchy nebo nedostupnosti jednoho nebo více prostředků je provedení požadované funkce stále zajištěno. K vytvoření redundance mohou být použity identické nebo naopak odlišné prostředky. [10] Příklad redundantního systému v paralelním zapojení a v zálohovaném zapojení je zobrazen na Obr. 9. [13]



Obr. 9 příklad redundantních systémů [13]

Diverzita – stejná funkce redundantního systému, která je realizována různými prostředky, principy, zařízeními různých výrobců apod. Diverzita je využívána k omezení vzniku poruch ze společnou (vnitřní) příčinou.

Diverzitu typicky rozdělujeme na dva typy:

- funkční diverzitu, kdy pro provedení dané činnosti jsou použity různé prostředky nebo principy, např. využití dvou různých veličin pro zjištění očekávaných provozních událostí nebo havarijních podmínek
- přístrojovou diverzitu, kdy jsou v redundantním systému použita zařízení různých výrobců, nebo zařízení pracující na různém principu.

Nevýhodou použití diverzity je větší složitost, rozměrnost a nákladnost systému, obvykle také delší doba potřebná k realizaci a testování systému. Může také zvýšit pravděpodobnost chyb při obsluze a údržbě systému. [16]

Nezávislost – principu nezávislosti je využíváno k zvýšení spolehlivosti systémů a k zamezení šíření negativních vlivů z jedné části redundantního systému do jiné.

Nezávislost se aplikuje v následujících oblastech:

- nezávislost mezi jednotlivými komponenty redundantního systému
- nezávislost mezi komponenty systému a vlivy postulovaných iniciačních událostí
- nezávislost mezi systémy nebo komponenty různých bezpečnostních tříd
- nezávislost mezi komponentami bezpečnostního systému a zařízeními, která nejsou součástí bezpečnostního systému. [16]

Nezávislosti je při návrhu systémů dosaženo použitím funkční izolace a fyzického oddělení.

Funkční izolace – omezuje nežádoucí vazby mezi systémy a zařízeními vzájemně, nebo i mezi redundantními kanály některého systému.

Fyzické oddělení – fyzického oddělení lze dosáhnout použitím fyzických bariér, vzdáleností, nebo vzájemnou kombinací těchto opatření.

3.4 Další předpisy důležité pro návrh vlastní spotřeby jaderné elektrárny

Při návrhu vlastní spotřeby jaderné elektrárny je možné vycházet z několika zdrojů. Vedle již zmíněných legislativních předpisů se jedná o technické normy a standardy.

V evropském kontextu považují za nejpodstatnější bezpečnostní standardy organizace IAEA, zvláště pak standard Safety of Nuclear Power Plants: Design, IAEA Safety

Standards Series No. SSR-2/1. Rev. 1. [10] Zde stanovené požadavky na elektrické napájecí systémy jsou pak rozvedeny v publikaci Design of Electrical Power Systems for Nuclear Power Plants. [8]

Tyto standardy mimo jiné stanovují, že energetické napájecí systémy v elektrárně mají být navrženy v souladu s relevantními národními bezpečnostními a technickými předpisy. Pro návrh vlastní spotřeby elektrárny v ČR se jedná především o ČSN 38 1120.

Z dalších zdrojů lze při návrhu vlastní spotřeby JE využít technické normy ČSN IEC, zejména pak ČSN IEC 61225 Jaderné elektrárny – Systémy kontroly a řízení důležité pro bezpečnost – Požadavky na elektrické napájení.

3.5 Rozdělení napájecích systémů dle požadavků IAEA

V této části stručně shrnu rozdělení elektrických napájecích systémů dle standardů IAEA.

Na jisté těžkosti jsem narazil při překladu názvů jednotlivých typů zdrojů do českého jazyka. Pro některé termíny se mi nepodařilo najít přesný český ekvivalent. Proto u jednotlivých typů zdrojů uvádím v závorce jejich anglické název.

Preferovaný zdroj napájení (preferred power supply) – základní zdroj napájení zahrnující napájecí systémy v elektrárně i vně elektrárny až k místu, ve kterém na ně navazují elektrické napájecí zdroje systémů důležitých pro bezpečnost. Pokud je Preferovaný zdroj napájení v provozu a je dostupný, jedná se vždy o základní zdroj napájení systémů důležitých pro bezpečnost.

Napájecí systém vně elektrárny (off-site power system) – zahrnuje elektrizační soustavu včetně síťové rozvodny a vedení, prostřednictvím kterých je elektrárna do této soustavy připojena.

Napájecí systém uvnitř elektrárny (on-site power system) – zahrnuje rozvodná zařízení a napájecí zdroje uvnitř elektrárny. Obsahuje AC a DC zdroje nezbytné pro uvedení a udržení elektrárny v kontrolovaném nebo bezpečném stavu po očekávané provozní události nebo při havarijních podmínkách do doby, než je obnoveno napájení z napájecího systému vně elektrárny. Dle důležitosti pro bezpečnost se dělí na samostatné napájecí subsystémy:

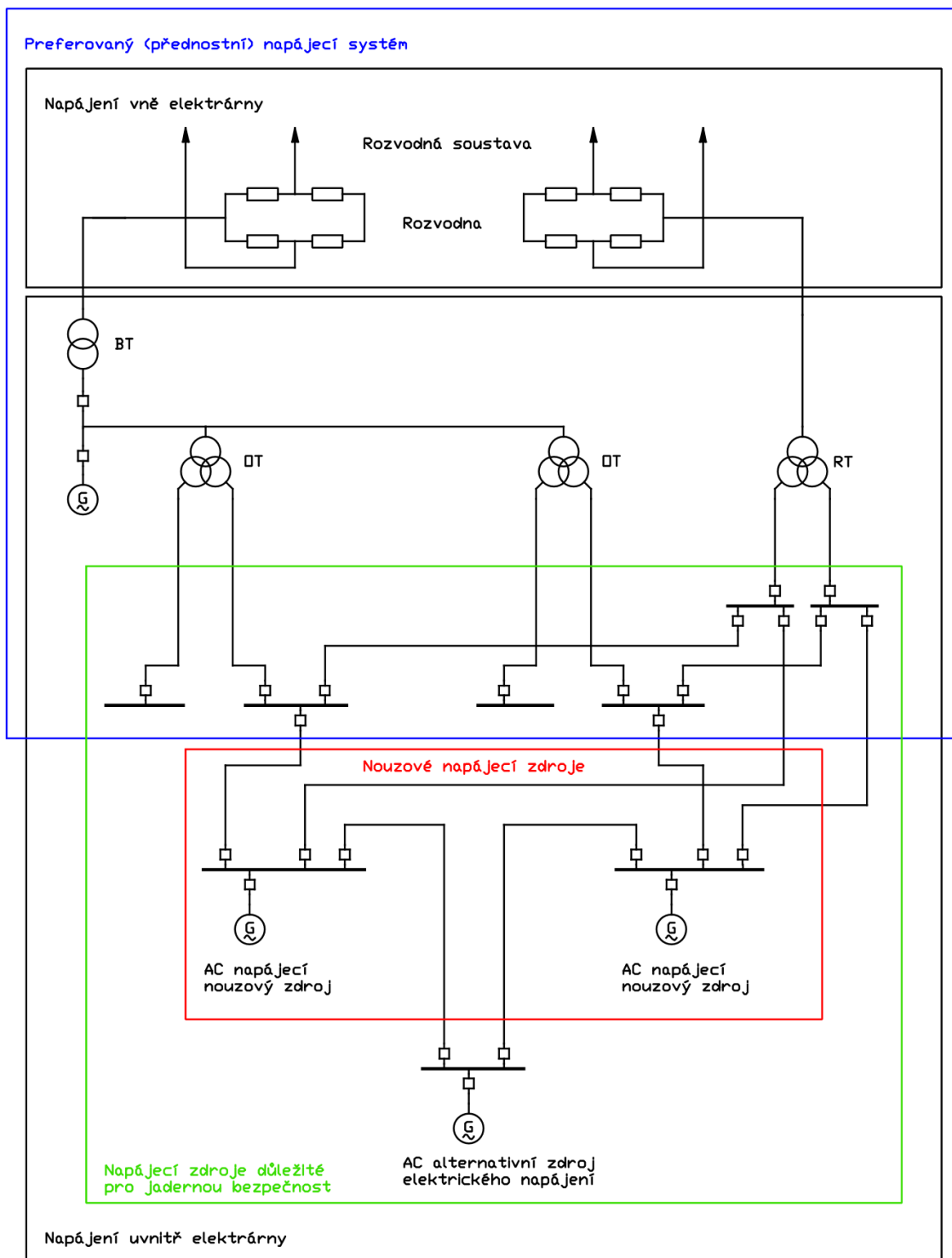
- důležité pro bezpečnost (napájecí bezpečnostní systémy a systémy související s bezpečností),
- nedůležité pro bezpečnost.

Hlavními součástmi tohoto systému jsou zejména hlavní generátory, blokové, odbočkové a rezervní transformátory, rozvodné systémy, vypínače, akumulátorové baterie, usměrňovače, střídače nebo UPS, kabelová vedení a nouzové AC napájecí zdroje (standby AC power sources).

Z hlediska požadavků na napájení jednotlivých zařízení se napájecí systémy uvnitř elektrárny dělí na následující typy:

- **AC napájecí systém** – napájecí systém určený pro spotřebiče, jejichž napájení může být na určitou dobu přerušeno. Obvykle zahrnuje i nouzové AC napájecí zdroje a alternativní AC napájecí zdroje (alternate AC power sources). V případě výpadku přednostního zdroje napájení je automaticky vydán povel ke spuštění nouzového AC napájecího zdroje. Zpravidla jsou nouzové AC napájecí zdroje určeny pro odstavení elektrárny po základní projektové nehodě, kdežto alternativní AC napájecí zdroje jsou určeny pro odstavení elektrárny v rozšířených projektových podmínkách.
- **DC napájecí systém** – systém stejnosměrných zdrojů napájející spotřebiče nepřerušovaně z akumulátorových baterií. Součástí těchto zdrojů jsou nabíječky baterií napájené z AC napájecích systémů.
- **AC systém nepřetržitého napájení** – poskytuje nepřetržité AC napájení např. ze střídačů napájených z DC napájecích systémů. Obsahují obvod bypassu, aby bylo, v případě údržby nebo v nebezpečných stavech, umožněno napájení bezpečnostních systémů přímo z AC napájecích systémů důležitých pro bezpečnost.

Na Obr. č. 10 je zobrazen příklad vztahů a rozhraní jednotlivých výše popsaných systémů.



Obr. 10 Vztahy mezi napájecími systémy [10]

3.6 Požadavky na nouzové napájecí zdroje pro případ ztráty vnějšího napájení

Návrh jaderné elektrárny musí obsahovat nouzové napájecí zdroje schopné dodávat potřebnou elektrickou energii při očekávaných provozních událostech a základních projektových nehodách při ztrátě napájení ze zdrojů vně elektrárny. Návrh musí rovněž

obsahovat alternativní zdroj napájení pro dodávku potřebné elektrické energie v rozšířených projektových podmínkách.

Návrhové specifikace nouzových a alternativních napájecích zdrojů musí obsahovat požadavky na jejich požadované funkce, kapacitu, požadovanou dobu jejich činnosti, dostupnost a kontinuitu napájení.

Napájení zařízení potřebných k zmírnění důsledků roztavení aktivní zóny reaktoru musí být umožněno z jakéhokoli dostupného zdroje elektrické energie.

Alternativní napájecí zdroj musí být schopen poskytovat potřebnou elektrickou energii pro zajištění integrity chladicího systému reaktoru a pro zabránění závažného poškození aktivní zóny reaktoru a vyhořelého paliva za podmínek ztráty napájení vně elektrárny a při současném selhání nouzových napájecích zdrojů.

Alternativní zdroj napájení má být nezávislý a umístěný fyzicky odděleně od nouzového napájecího zdroje. Čas nutný pro uvedení alternativního zdroje napájení do provozu musí být v souladu s dobou provozu nouzového zdroje z baterií.

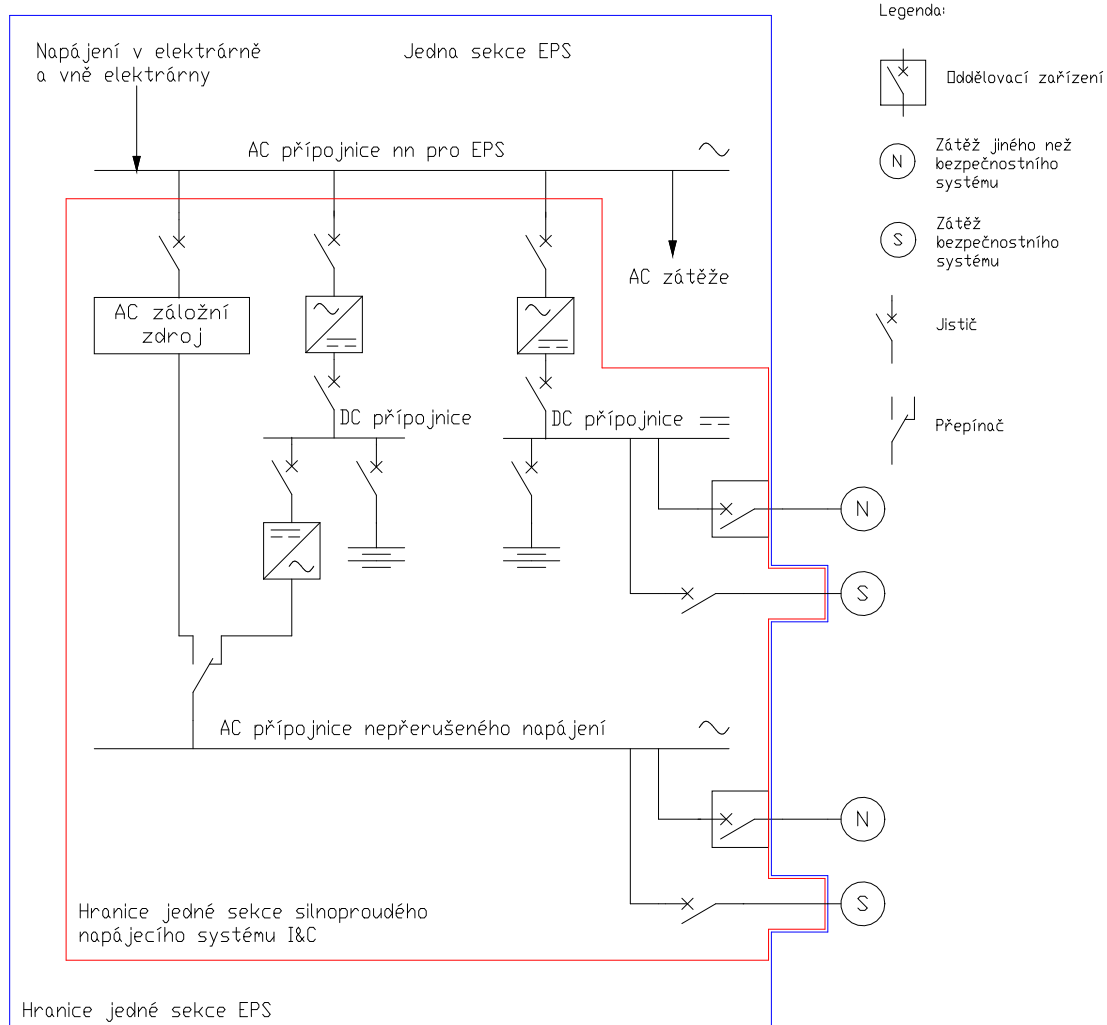
V případě ztráty napájení z AC napájecích zdrojů musí být zaručena dodávka energie pro monitorovací systémy klíčových parametrů elektrárny a pro zajištění okamžitých činností nutných pro zachování bezpečnosti.

Projektová východiska pro jakýkoliv diesel generátor nebo soustrojí, které zajišťují nouzovou dodávku elektrické energie systémům důležitým pro bezpečnost musí obsahovat:

- Požadavky na příslušející systémy skladování a dodávku pohonných hmot, pro jejich zajištění v požadovaném čase
- Požadavek na schopnost startu soustrojí v požadovaném čase a jeho provozu při všech specifikovaných podmínkách
- Požadavky na podpůrné systémy (např. systémy chlazení). [10]

3.7 Návrh napájecích zdrojů systémů I&C

Zdroje pro napájení systémů řízení a kontroly (I&C) jsou důležitou součástí vlastní spotřeby jaderné elektrárny. Na Obr. 11 uvádím příklad napájecího systému, ze kterého jsou napájeny jak bezpečnostní systémy, tak zátěže ostatních systémů.



Obr. 11 Příklad napájecích systémů I&C [3]

3.8 Ochrana do hloubky

Důležitým konceptem pro zajištění bezpečnosti jaderné elektrárny je tzv. ochrana do hloubky. Jedná se soubor překrývajících se opatření, tak aby případné selhání jednoho opatření bylo kompenzováno jinými. Aplikace koncepce ochrany do hloubky poskytuje odstupňovanou ochranu s cílem prevence nehod, případně zajišťuje odpovídající ochranu v případě selhání prevence. Způsob, jakým přispívají jednotlivé druhy napájecích systémů k dosažení určených cílů je zřejmý z Obr. 12

| Úroveň ochrany | Cíl | Základní prostředky pro dosažení cíle | Aplikace základních prostředků na elektrické napájecí systémy |
|----------------|---|---|---|
| 1 | Předcházení odchylkám od normálního provozu, předcházení poruchám | Inherentní vlastnosti systémů, vedoucí k zajištění jaderné bezpečnosti, konzervativní rysy projektu a vysoká kvalita konstrukce a provozu zařízení, systémy kontroly a řízení provozu | Jasná a srozumitelná projektová východiska, robustní a spolehlivá distirbuční soustava, robustní a spolehlivé elektrické napájecí systémy uvnitř elektrárny |
| 2 | Identifikace poruch a zvládnání očekávaných provozních událostí (náprava abnormálního provozu), přechod do bezpečného, stabilizovaného a kontrolovaného stavu | Systémy kontroly a řízení a příslušné provozní předpisy (organizační opatření) | Robustní a spolehlivý systém elektrických ochrany a jejich koordinace, schopnost záskoku napájecích zdrojů, možnost provozu pouze na vlastní spotřebu |
| 3 | Zvládnání projektových nehod a přechod do bezpečného, stabilizovaného a kontrolovaného stavu | Bezpečnostní systémy a havarijní předpisy (organizační opatření) | Robustní a spolehlivé nouzové napájecí systémy a pohotovostní stacionární nouzové AC napájecí zdroje (např. dieselgenerátory) |
| 4 | Předcházení a zmírňování následků těžkých havárií | Doplňková opatření, včetně specifických systémů (technické prostředky) a programů pro zvládnání těžkých havárií (organizační opatření) | Robustní a spolehlivé alternativní AC napájecí zdroje |
| 5 | Zmírňování radiačních následků významných úniků radioaktivních látek | Opatření na ochranu obyvatelstva a životního prostředí při radiační nehodě | Opatření mimo prostor elektrárny, v rámci této práce nejsou řešena |

Obr. 12 koncepce ochrany do hloubky

4. Problematika přechodu VS na záložní napájení

4.1 Příčiny přechodu VS na záložní napájení

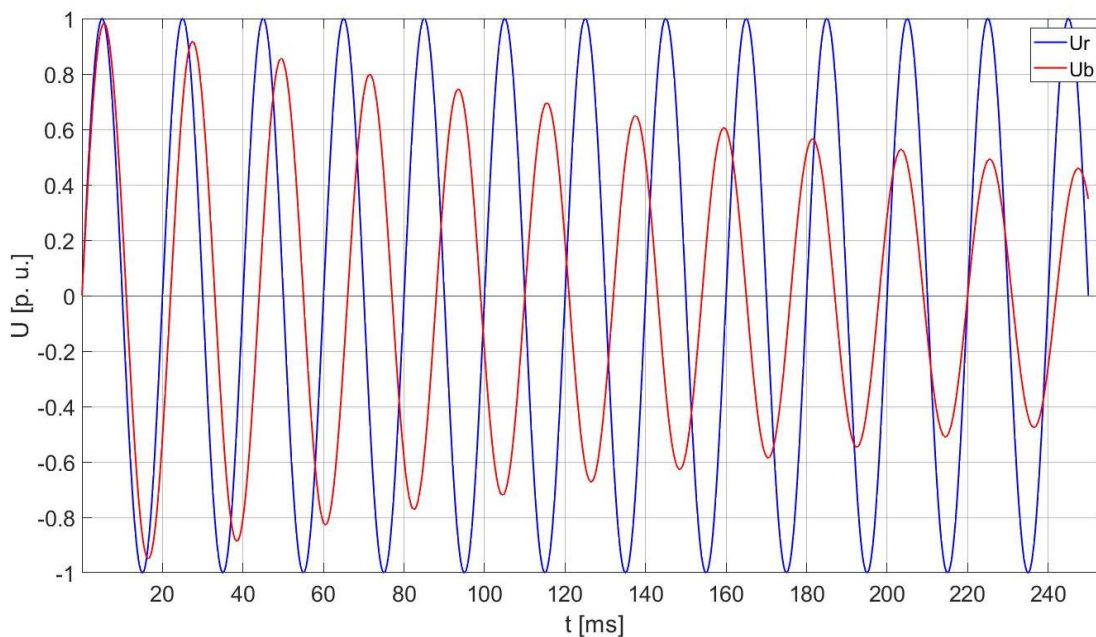
Přechod VS z pracovního zdroje napájení na zdroj rezervní má v případě elektráren nejčastěji tyto příčiny:

- poruchu pracovního zdroje,
- úmyslné odstavení pracovního zdroje z důvodu revizí, údržby nebo rekonstrukce.

V elektrárnách je mnoho procesů zajišťováno pohony, jejichž součástí jsou asynchronní elektromotory (AM) o velkém výkonu. Bezprostředně po ztrátě napětí na pracovním zdroji dochází na přípojnicích, na které jsou tyto pohony připojeny, k okamžitému poklesu frekvence vlivem skluzu rotorů AM. Následně dochází k dalšímu postupnému poklesu frekvence a amplitudy napětí. Míra tohoto poklesu je zpravidla ovlivněna:

- velikostí motorů – u větších AM klesá amplituda napětí pomaleji než u menších motorů,
- zatížením motorů – s větším zatížením motorů klesá frekvence napětí rychleji,
- setrvačností soustavy – čím větší je celkový moment setrvačnosti soustavy pohonů společně se setrvačnou energií poháněných médií, tím je pokles frekvence pomalejší. To má přímý vliv na rychlost změny fázového posunu $\Delta\varphi$ mezi napětím přípojnic s motory a napětím rezervního zdroje. U soustav s nízkou setrvačností dochází k rychlému růstu $\Delta\varphi$ v důsledku rychlého poklesu frekvence.

Příklad vývoje amplitud frekvencí a změny fázového posunu obou napětí v závislosti na čase je zobrazen na Obr. 13, kde U_r je napětí rezervního zdroje a U_b je napětí přípojnic s připojenými pohony s AM. Amplitudy napětí jsou zobrazeny v poměrných jednotkách.



Obr. 13 Napětí na přípojnicích s motory a rezervního zdroje

Při nekontrolovaném obnovení napájení z rezervního zdroje by mohlo dojít k přechodnému ději s nepřipustně velkou změnou proudu a momentu, které by mohly vyvolat mechanické poškození pohonů nebo poháněných zařízení.

Úkolem systémů pro zajištění kontrolovaného přechodu napájení z jednoho zdroje na druhý je tedy:

- zajistit kontinuitu napájení připojených zařízení, aby mohl pokračovat probíhající proces,
- zajistit přechod napájení na záložní zdroj tak, aby nedošlo k poškození připojených zařízení.

4.2 Způsoby přechodu na záložní napájení

Způsoby přechodu VS na záložní napájení lze rozdělit na 2 základní typy:

1) Přechod beze ztráty napájení (closed transition transfer, hot parallel transfer)

Způsob přepnutí zdrojů, kde k sepnutí vypínače záložního zdroje dojde krátce před vypnutím vypínače pracovního zdroje. Tento způsob zahrnuje krátké paralelní propojení obou zdrojů. V tomto případě nedochází ke ztrátě napájení na přípojnicích. Předpokladem je možnost alespoň krátkodobého paralelního chodu obou zdrojů. Zpravidla je kontrolována fáze napětí nového zdroje, aby bylo zajištěno, že úhel $\Delta\varphi$ mezi napětími obou zdrojů je v okamžiku zapnutí vypínače v požadovaných mezích. Tento způsob lze

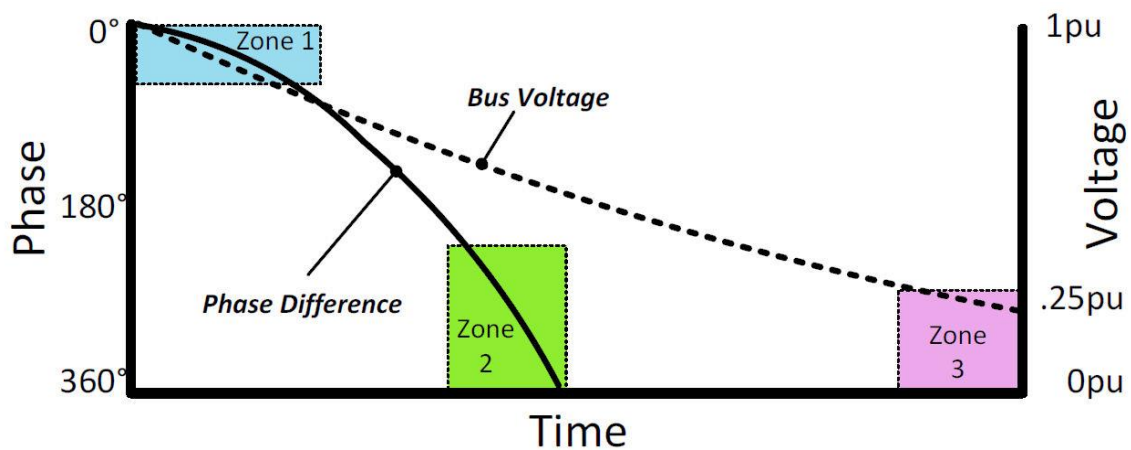
použít pouze pro plánovaný přechod napájení z jednoho zdroje na druhý a nelze ho použít v případě nenadálé ztráty napájení z původního zdroje.

2) Přechod se ztrátou napájení (open transition transfer)

Při přechodu se ztrátou napájení nedochází k paralelnímu spojení napájecích zdrojů. K sepnutí vypínače rezervního zdroje dojde až po rozepnutí vypínače původního zdroje.

Tento způsob přechodu napájení na rezervní zdroj může být zajištěn několika různými metodami:

- Rychlé přepnutí (fast transfer)
- Přepnutí „ve fázi“ (in-phase transfer)
- Přepnutí na základě podpětí (residual voltage transfer)
- Přepnutí v pevně nastaveném čase (fixed time transfer, slow transfer)

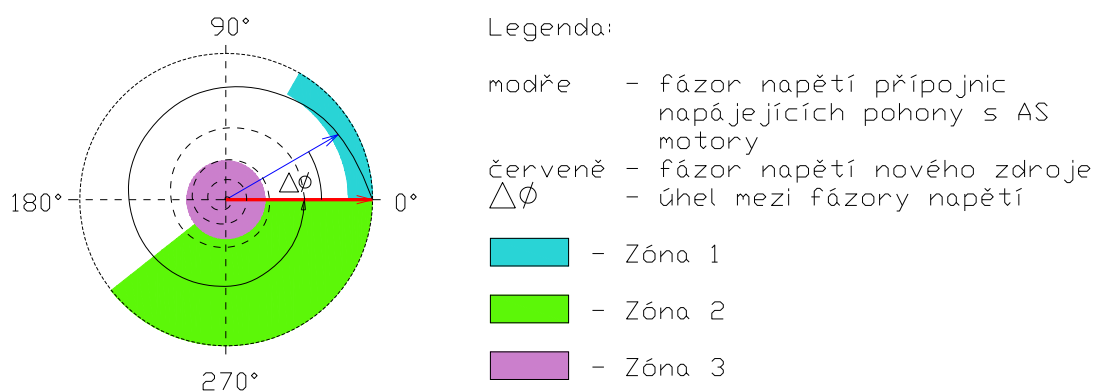


Obr. 14 Převzato z [1]

Výše uvedené metody jsou ilustrovány na Obr. 14, kde

| | |
|------------------|---|
| Voltage znamená | napětí rezervního zdroje v poměrných jednotkách |
| Bus Voltage | napětí na sběrnících rozvodného zařízení, na které jsou připojeny motory pohonů v poměrných jednotkách vztažené k napětí rezervního zdroje |
| Phase Difference | úhel $\Delta\varphi$ (fázový posun) mezi napětím rezervního zdroje a napětím na sběrnících rozvodného zařízení, na které jsou připojeny AM pohonů |

Na Obr. 14 je znázorněna závislost amplitudy napětí na přípojnicích s AM na $\Delta\varphi$ vyplývající z Obr. 15. Fázor napětí nového (rezervního) zdroje je umístěn na osu x, fázor napětí přípojnic s AS motory je zpožděn o úhel $\Delta\varphi$, v tomto případě o 30° . Koncový bod tohoto fázoru napětí se v závislosti na $\Delta\varphi$ pohybuje po naznačené křivce, která je pro $\Delta\varphi \leq 360^\circ$ vyobrazena plnou čarou, čárkovaně je pak naznačen odhad možné trajektorie pro $\Delta\varphi > 360^\circ$.



Obr. 15 Vztahy mezi fázory napětí

4.3 Rychlé přepnutí

Touto metodou dojde k sepnutí vypínače rezervního zdroje, pokud se velikost fázového posunu $\Delta\varphi$ mezi napětím na přípojnicích s připojenými motory a napětím rezervního zdroje nachází v Zóně 1 Obr. 14 a Obr. 15, nebo do ní směřuje. Metoda vyžaduje použití dostatečně rychlého řídicího přístroje a také trvalou kontrolu $\Delta\varphi$ na rozepnutém vypínači rezervního zdroje mezi oběma napětími. Může být doplněna kontrolou, zda se napětí záložního zdroje nachází v požadovaných mezích.

4.4 Přepnutí „ve fázi“

Touto metodou dojde k sepnutí vypínače rezervního zdroje, pokud se velikost úhlu $\Delta\varphi$ nachází v Zóně 2 Obr. 14 a Obr. 15. Cílem této metody přepnutí je, aby k sepnutí vypínače rezervního zdroje došlo ve chvíli, kdy je fázový posun obou napětí na jeho kontaktech roven 0° . V nevhodnějším případě dojde k sepnutí vypínače při první možné shodě fáze obou napětí. Povel k sepnutí vypínače je vydán v předstihu, v závislosti na:

- fázovém posunu $\Delta\varphi$ mezi napětí na sběrnicích s připojenými motory a napětí rezervního zdroje,
- rozdílu frekvence těchto napětí Δf a jeho časové derivaci,
- skutečné době sepnutí vypínače rezervního zdroje.

Zároveň je kontrolováno, že rozdíl frekvence Δf a velikost napětí rezervního zdroje jsou v požadovaných mezích. Řídicí jednotka, která provádí potřebné výpočty v reálném čase a vydává povel k sepnutí vypínače, musí být dostatečně rychlá, doporučená reakční doba je $\frac{1}{2}$ periody a méně.

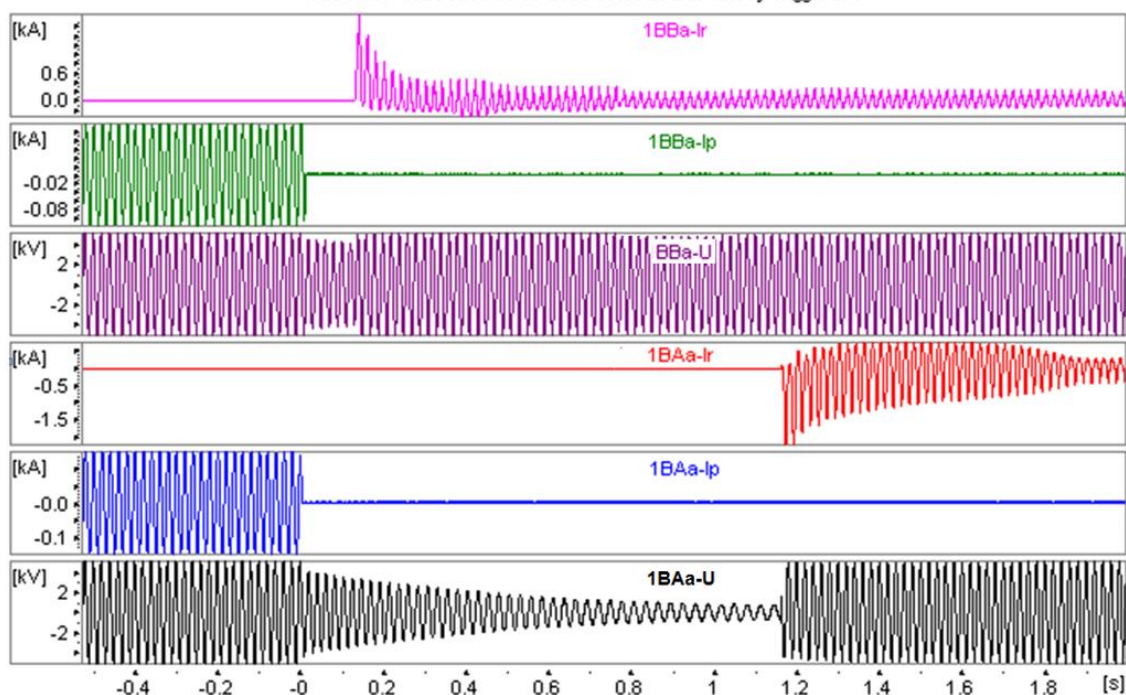
4.5 Přepnutí na základě podpětí

Jedná se o způsob přepnutí na rezervní zdroj, kdy napětí na sběrnicích s motory musí nejprve klesnout pod nastavenou limitní hodnotu, zpravidla $< 0,3$ p. u. napětí rezervního zdroje. Fázový posun mezi oběma napětími $\Delta\varphi$, ani rozdíl frekvencí Δf nejsou sledovány. K sepnutí vypínače rezervního zdroje musí dojít dříve, než zapůsobí podpětěťové ochrany jednotlivých motorů. Z tohoto důvodu musí být nastavení limitní úrovně napětí koordinováno s nastavením vypínacího času jejich podpětěťových ochran. Tyto ochrany musí být schopny správné funkce i při nižších frekvencích, než je jmenovitá frekvence a také při prudkém poklesu napětí.

Za dobu potřebnou k poklesu napětí na nastavenou mez, může dojít k příliš velkému poklesu frekvence na sběrnicích a tím k zastavení motorů některých pohonů. V tom případě je nutné tyto motory před přepnutím na nový zdroj odpojit. Odpojení vybraných motorů je nutné i v případě, kdy nový zdroj není schopen zajistit současný rozběh všech připojených motorů s ohledem na dovolený úbytek napětí. Opětovné připojení motorů pak musí být prováděno s časovou prodlevou individuálně nebo po skupinách na základě analýzy. Na Obr. xx a Obr. xx je oblast pro tento způsob přepnutí vyznačena jako Zóna 3.

Srovnání různých případů záskoku z jaderné elektrárny Temelín (ETE) je zobrazeno na Obr. 16. V horní části obrázku je zobrazen rychlý záskok ve spodní je zobrazen záskok na základě podpětí. V obou případech jsou zobrazeny záznamy proudu rezervního zdroje, pracovního zdroje a napětí na přípojnicích. Ze záznamu je zřetelný pokles napětí přípojnic. V případě rychlého záskoku je zaznamenaný pokles napětí poměrně nevýrazný, protože došlo k rychlému obnovení napájení. V druhém případě došlo k hlubokému poklesu hodnoty napětí až téměř k nule.

AZR R6kV 1BAa, 1BBa od působení HZO
TES s.r.o. TRIGGER: 16.08.2010 10:10:29.379 síťový trigger č. 4



Obr. 16 Příklad jednotlivých druhů záskoků

4.6 Přepnutí v pevně nastaveném čase

Jedná se o metodu přepnutí zdrojů, kde mezi rozepnutím vypínače původního zdroje a sepnutím vypínače nového zdroje dojde po pevně nastaveném čase, který je zpravidla větší než 20 až 60 period napětí nového zdroje, pokud z jakéhokoliv důvodu nemohlo dojít k přepnutí dříve uvedenými metodami. Tento případ se neočekává, pokud se rychlá synchronizační řídicí jednotka nachází v rámci normálních provozních parametrů a obvykle se vykytuje pouze v případě téměř současného výskytu několika poruch. Proto lze přepnutí v pevně nastaveném čase považovat za řešení havarijního stavu.

4.7 Režimy sepnutí vypínače rezervního zdroje

Sepnutí vypínače rezervního zdroje může probíhat ve dvou režimech, simultánně, nebo sekvenčně.

4.7.1 Sekvenční režim

V sekvenčním režimu je povel k sepnutí vypínače rezervního zdroje vydán až po vypnutí vypínače pracovního zdroje. Tím je zamezeno nežádoucímu sepnutí vypínače nového zdroje v případě, že z jakéhokoli důvodu nedojde k vypnutí vypínače původního zdroje. Informace o vypnutí vypínače je zjišťována z jeho pomocných kontaktů.

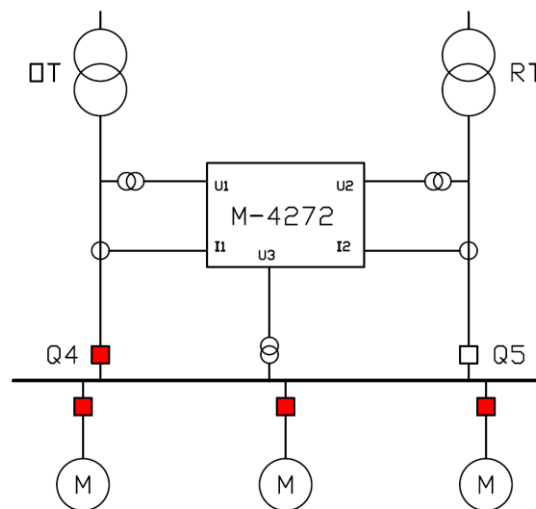
4.7.2 Simultánní režim

V simultánním režimu není před vydáním povelu k sepnutí vypínače nového zdroje kontrolováno vypnutí vypínače původního zdroje. Tento režim může být dále nekontrolovaný, nebo kontrolovaný. V nekontrolovaném případě je vypnutí vypínače pracovního zdroje a sepnutí vypínače rezervního zdroje iniciováno v jeden okamžik za účelem minimalizace času výpadku napájení zátěže. V kontrolovaném případě je sepnutí vypínače nového zdroje blokováno do doby, než je možné provést rychlé přepnutí, přepnutí ve fázi, nebo přepnutí na základě podpětí.

4.8 Volba záskokových systémů

Zatímco přepnutí zdrojů na základě podpětí nebo v pevně nastaveném čase lze realizovat poměrně jednoduchými prostředky, pro rychlé přepnutí nebo přepnutí ve fázi je výhodné použít specializované synchronizační systémy.

Příkladem takového systému je např. digitální synchronizační relé M-4272 Motor Bus Transfer System americké společnosti Beckwith Electric. Disponuje všemi výše uvedenými metodami a režimy záskoků a jeho funkce je dlouhodobě prověřena z nasazení na jaderné elektrárně Temelín. Principiální schéma zapojení je uvedeno na Obr. 17



Obr. 17 Schéma zapojení synchronizačního systému

5. Výpočet VS JE

5.1 Výchozí údaje

V této části práce provedu orientační výpočty pro návrh hlavních prvků vlastní spotřeby jednoho bloku jaderné elektrárny. Při výpočtu použiji tyto vstupní údaje:

| | | |
|---------------|--------|--------|
| Soustavy | 400 kV | 110 kV |
| U_n [kV] | 400 | 110 |
| S''_k [MVA] | 30 000 | 7 500 |

| | | |
|---------------------------|-----------------------|--------------------------|
| Vedení | 400 kV | 110 kV |
| X_{ved} [Ω /km] | 0,2989 | 0,4091 |
| l [km] | 5 | 5 |
| Typ vedení | jednoduché AlFe 185/6 | jednoduché, AlFe 3x450/6 |

| Turboalternátor | |
|-----------------|-------|
| U_n [kV] | 24 |
| S_n [MVA] | 1 250 |
| x''_d [%] | 25 |

| Transformátory | Blokový | Odbočkové | Rezervní |
|----------------|---------|--------------|--------------|
| U_n [kV] | 400/24 | 24/10/10 | 110/10/10 |
| S_n [MVA] | 1 250 | 63/31,5/31,5 | 63/31,5/31,5 |
| u_k [%] | 14 | 8/8/16 | 8/8/16 |

5.2 Volba napěťové hladiny rozveden vn

Jmenovité napětí vn rozveden vlastní spotřeby volím $U_{n_VS} = 10$ kV.

Uvedenou napěťovou hladinu volím kvůli možnosti použití spotřebičů s menšími jmenovitými proudy, pro omezení zkratových proudů, ztrát v rozvodu a možnosti hospodárnější volby průřezů přípojnic, kabelů a vodičů.

5.3 Volba odbočkových a rezervních transformátorů

Při volbu odbočkového transformátoru jsem vycházel z dat výkonové bilance jaderné elektrárny Temelín. Dle údajů získaných při návštěvě elektrárny se celkové zatížení jednotlivých odbočkových transformátorů pohybuje přibližně v rozmezí 40 – 55 MVA v závislosti na provozním režimu bloku. Protože provádím výpočet VS pro elektrárnu

podobných výkonových parametrů, uvažuji s podobným zatížením odbočkových a rezervních transformátorů.

5.4 Volba pohonů

Pro výpočty jsem použil parametry skutečných pohonů z ETE, jejich technické údaje jsou zobrazeny na Obr. 18.

| Číslo pohonu | Název pohonu | výkon P_n [kW] | počet na blok | účinnost η | účinník $\cos \phi$ | Napětí U [kV] | Proud I_n [A] | Přepočítaný I_n [kA] na $U_n = 10$ kV | Záběrný proud i_z | Zdánlivý výkon S_n [MVA] | Reaktance $X_m = 1/i_z$ |
|--------------|--|------------------|---------------|-----------------|---------------------|-----------------|-----------------|---|---------------------|----------------------------|-------------------------|
| M1.1-4 | Hlavní cirkulační čerpadlo | 8 000 | 4 | 0,97 | 0,89 | 6 | 880,0 | 0,528 | 9,1 | 9,267 | 0,110 |
| M2.1-2 | Čerpadlo chladicí vody | 7 000 | 2 | 0,95 | 0,75 | 6 | 946,0 | 0,568 | 5,8 | 9,825 | 0,172 |
| M3.1-4 | Kondenzátní čerpadlo | 2 000 | 4 | 0,96 | 0,913 | 6 | 224,0 | 0,134 | 5,9 | 2,282 | 0,169 |
| M4.1-2 | Čerpadlo TCHNV | 630 | 2 | 0,947 | 0,84 | 6 | 73,8 | 0,044 | 5,8 | 0,792 | 0,172 |
| M5.1-2 | Podávací čerpadlo separačního kondenzátoru | 500 | 2 | 0,945 | 0,87 | 6 | 57,2 | 0,034 | 5,3 | 0,608 | 0,189 |
| M6.1-6 | Podávací čerpadlo NTO | 315 | 6 | 0,944 | 0,87 | 6 | 36,9 | 0,022 | 5,6 | 0,384 | 0,179 |
| M7.1-3 | Vodoproudá vývěva | 315 | 3 | 0,945 | 0,82 | 6 | 39,2 | 0,024 | 5,9 | 0,407 | 0,169 |
| M8.1-4 | Kondenzátní čerpadlo - zimní oběhovka | 200 | 4 | 0,934 | 0,84 | 6 | 23,7 | 0,014 | 5,6 | 0,255 | 0,179 |
| M9.1-2 | Pomocné kondenzátní čerpadlo | 200 | 2 | 0,934 | 0,84 | 6 | 24,5 | 0,015 | 5,6 | 0,255 | 0,179 |
| M10.1-3 | Čerpadlo havarijního doplňování bóru | 835 | 3 | 0,94 | 0,912 | 6 | 92,0 | 0,055 | 5,3 | 0,974 | 0,189 |
| M11.1-3 | Havarijní sprchové čerpadlo | 500 | 3 | 0,957 | 0,89 | 6 | 56,6 | 0,034 | 5,1 | 0,587 | 0,196 |
| M12.1-3 | Čerpadlo NT havarijní dochlazovací | 800 | 3 | 0,96 | 0,89 | 6 | 90,0 | 0,054 | 5,3 | 0,936 | 0,189 |
| M13.1-3 | Čerpadlo VT havarijní dochlazovací | 835 | 3 | 0,94 | 0,912 | 6 | 93,0 | 0,056 | 6,3 | 0,974 | 0,159 |
| M14.1-2 | Elektronapajčka | 650 | 2 | 0,95 | 0,86 | 6 | 77,0 | 0,046 | 5,6 | 0,796 | 0,179 |
| M15.1-2 | Čerpadlo TVD (chlazení dieselgenerátorů) | 680 | 2 | 0,935 | 0,81 | 6 | 87,0 | 0,052 | 6,0 | 0,898 | 0,167 |
| M16.1-2 | Čerpadlo pro chlazení SRDGS | 250 | 2 | 0,942 | 0,825 | 6 | 31,0 | 0,019 | 5,8 | 0,322 | 0,172 |

Význam zkratk v tabulce: NTO - nízkotlaký ohřev TCHNV - technická voda nedůležitá TVD - technická voda důležitá
SRDGS - společná rezervní dieselgenerátorová stanice NT/VT - nízkotlaké / vysokotlaké

Obr. 18 Seznam pohonů

5.5 Výpočet zkratových poměrů

Orientační výpočet zkratových poměrů pro prvotní návrh dimenzování hlavních prvků VS provedu dle zásad dříve platné ČSN 33 3020. Postupy dle této normy poskytují pro zamýšlený účel dostatečně přesné výsledky. Pro následné přesnější výpočty by bylo nutné použít současně platnou normu ČSN EN 60909. Při výpočtech používám symboly pro označení veličin platné v současnosti.

Výpočet provedu v poměrných jednotkách vztažených k zdánlivému výkonu blokového transformátoru $S_v = S_{nBT} = 1250 \text{ MVA}$ a napětí v místě uvažovaného zkratu $U_v = 10 \text{ kV}$.

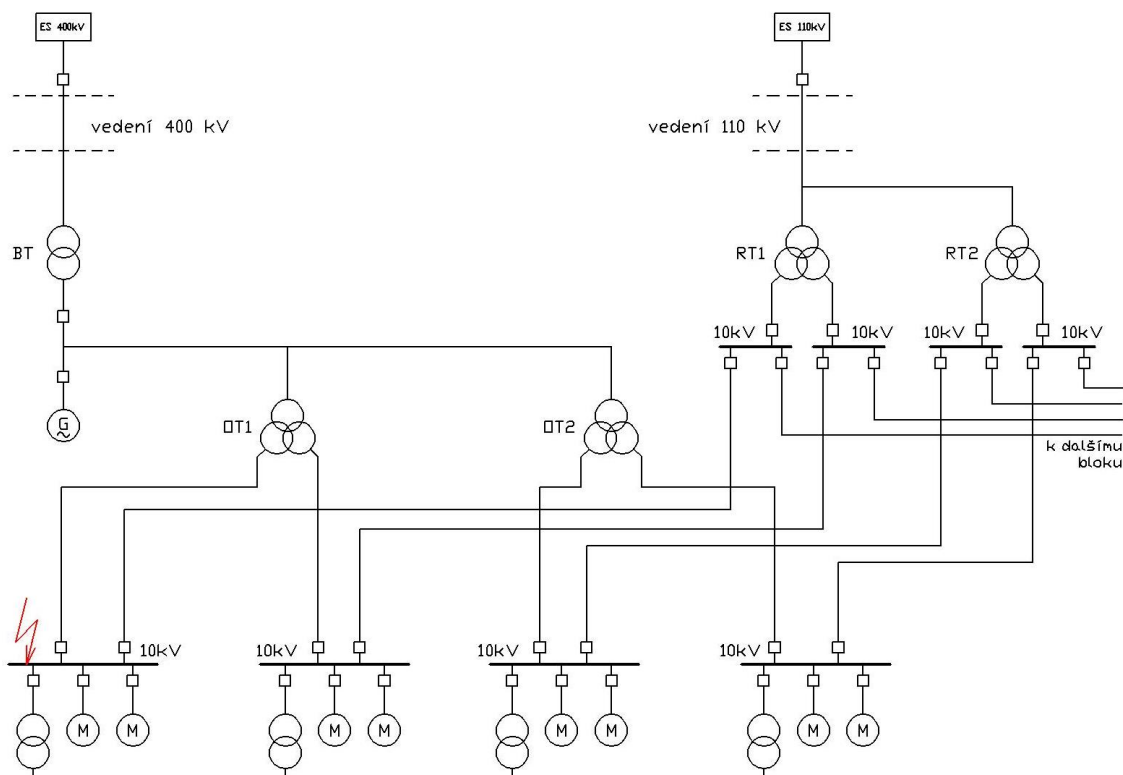
Pro dimenzování elektrických zařízení určím hodnoty maximálních zkratových proudů:

- Počáteční rázový zkratový proud I''_k [kA]
- Nárazový zkratový proud I_p [kA]

Výpočet zkratů jsem provedu pro tyto dva případy:

- 1) Zkrat na přípojnicích rozvodny 10 kV, která napájí hlavní motorové zátěže včetně HCČ, při napájení z pracovního zdroje,
- 2) zkrat ve stejném místě při napájení z rezervního zdroje.

Zjednodušené schéma VS s vyobrazením místa zkratu je na Obr. 19.



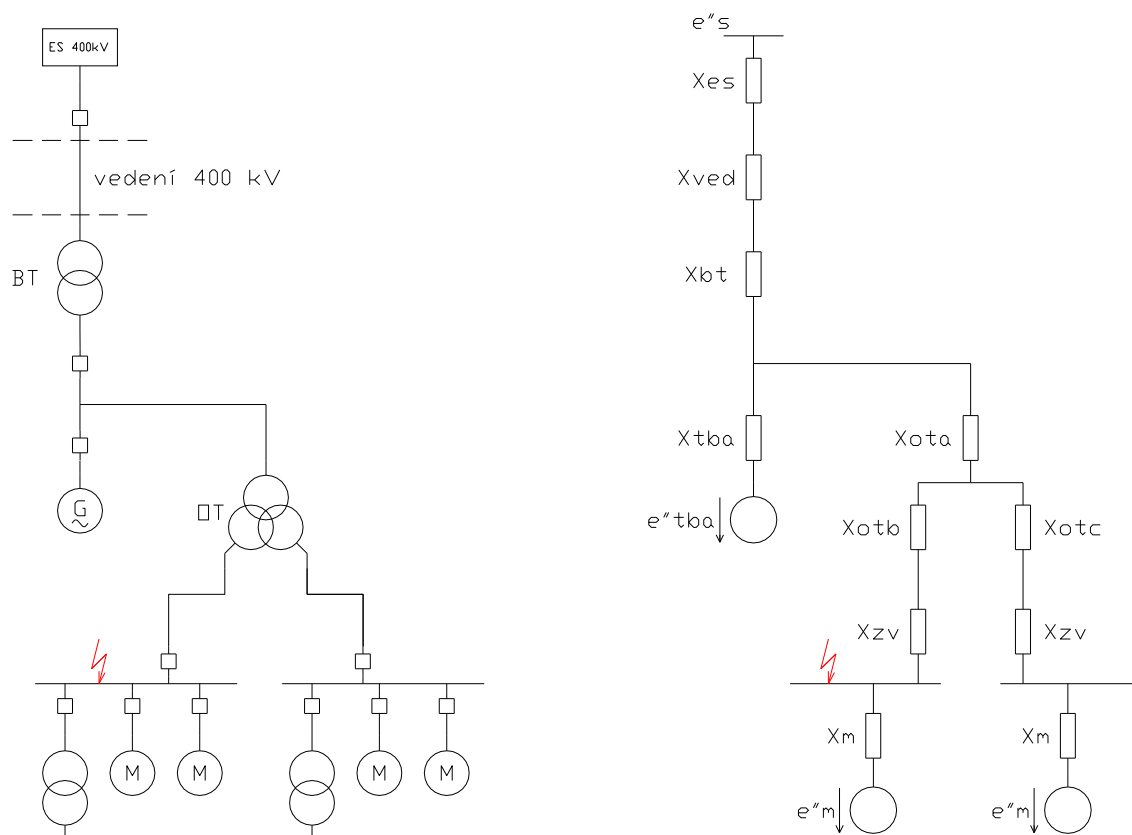
Obr. 19

Za účelem úpravy schématu VS a pro výpočet zkratových poměrů jsem provedl tato zjednodušení:

- U transformátorů pracuji s fiktivními převody, které jsou dány jmenovitými napětími sítí, neuvažuji rezistanci vinutí transformátorů,
- neuvažuji rezistanci venkovních vedení,
- neuvažuji příspěvek asynchronních motorů oddělených od místa zkratu dvojitými transformacemi,
- neuvažuji příspěvek asynchronních motorů na hladině nn,
- asynchronní motory připojené radiálně do místa zkratu jsou nahrazeny jedním náhradním motorem,
- neuvažuji vliv přívodů kabelového vedení k asynchronním motorům,
- dílčí příspěvky zkratového proudu, přicházející do místa zkratu různými cestami sčítám algebraicky.

5.5.1 Výpočet zkratových poměrů při napájení VS z pracovního zdroje

Schéma VS a náhradní schéma po aplikaci výše uvedených zjednodušujících předpokladů je uvedeno na Obr. 20.



Obr. 20

Nejprve vypočítám vnitřní napětí zdrojů a náhradní reaktance jednotlivých prvků náhradního schématu.

5.5.2 Vnitřní napětí zdrojů

Při výpočtu zkratových proudů se používá fázové napětí zdrojů. Vnitřní napětí zdrojů jsem určil v poměrných jednotkách pomocí napěťového součinitele c dle vztahu:

$$u_v = \frac{c \cdot u_n}{\sqrt{3}} \quad [p. u.],$$

kde součinitel c jsem zvolil dle uvedené normy.

| Napěťový součinitel | c_{max} | c_{min} |
|-----------------------------------|-----------|-----------|
| Při zkratu v soustavě vn a 110 kV | 1,1 | 1,0 |
| Při zkratu v soustavě 400 kV | 1,05 | 1,0 |
| Asynchronní motory | 0,9 | - |

5.5.3 Určení reaktancí jednotlivých prvků

Všechny vypočtené reaktance jsou vztaženy k jmenovitému výkonu blokového transformátoru 1200 MVA a napětí v místě zkratu 10 kV a jsou uvedeny v poměrných jednotkách.

Reaktance elektrizační soustavy:

$$x_{es} = X_{es_v} \cdot \frac{S_v}{U_v^2} = X_{es_n} \cdot \frac{1}{p^2} \cdot \frac{S_v}{U_v^2} = c \cdot \frac{U_n^2}{S_k} \cdot \frac{U_v^2}{U_n^2} \cdot \frac{S_v}{U_v^2} = c \cdot \frac{S_v}{S_k} \quad [p. u.],$$

kde x_{es} – reaktance soustavy v poměrných jednotkách

X_{es_v} – reaktance soustavy v $[\Omega]$ přepočtená na vztažné napětí

X_{es_n} – reaktance soustavy v $[\Omega]$

S_v – vztažný výkon

S_k – trojfázový zkratový výkon soustavy

p – transformační převod mezi jmenovitou napěťovou hladinou zjišťované reaktance a vztažným napětím

U_v – vztažné napětí

Pro soustavu 400 kV po dosažení:

$$x_{es} = c \cdot \frac{S_v}{S_k} = 1,05 \cdot \frac{1200}{30\,000} = 0,042 \text{ p. u.}$$

Reaktance venkovního vedení:

$$\begin{aligned} x_{ved} &= X_{ved_v} \cdot \frac{S_v}{U_v^2} = X_{ved_n} \cdot \frac{1}{p^2} \cdot \frac{S_v}{U_v^2} = X \cdot l \cdot \frac{U_v^2}{U_n^2} \cdot \frac{S_v}{U_v^2} = X \cdot l \cdot \frac{S_v}{U_n^2} = 0,2989 \cdot 5 \cdot \frac{1\,200}{400^2} \\ &= 0,0112 \text{ p. u.} \end{aligned}$$

Reaktance blokového transformátoru:

$$x_{BT} = X_{BT_v} \cdot \frac{S_v}{U_v^2} = X_{BT_n} \cdot \frac{1}{p^2} \cdot \frac{S_v}{U_v^2} = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_{nBT}^2}{S_{nBT}} \cdot \frac{U_v^2}{U_{nBT}^2} \cdot \frac{S_{nBT}}{U_v^2} = \frac{u_k}{100} = \frac{14}{100} = 0,14 \text{ p. u.},$$

kde u_k – napětí nakrátko v %

U_{nBT} – jmenovité napětí transformátoru na straně vyššího napětí

$S_{nBT} = S_v$ – jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru

Reaktance turboalternátoru:

$$x_{TBA} = X''_{d_v} \cdot \frac{S_v}{U_v^2} = X''_{d_n} \cdot \frac{1}{p^2} \cdot \frac{S_v}{U_v^2} = \frac{x''_d}{100} \cdot \frac{U_{nTBA}^2}{S_{nTBA}} \cdot \frac{U_v^2}{U_{nTBA}^2} \cdot \frac{S_v}{U_v^2} = \frac{x''_d}{100} \cdot \frac{S_v}{S_{nTBA}} = \frac{25}{100} \cdot \frac{1200}{1250} = 0,24 \text{ p. u.},$$

kde x''_d – reaktance rázová sycená [%]

Reaktance odbočkového transformátoru:

$$\begin{aligned} x_A = z_A &= \frac{1}{2} \cdot (Z_{AB} + Z_{AC} - Z_{BC}) \cdot \frac{1}{p^2} \cdot \frac{S_v}{U_v^2} \\ &= \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{u_{kAB}}{100} \cdot \frac{U_{nOTA}^2}{S_{nOT}} + \frac{u_{kAC}}{100} \cdot \frac{U_{nOTA}^2}{S_{nOT}} - \frac{u_{kBC}}{100} \cdot \frac{U_{nOTA}^2}{S_{nOT}} \right) \cdot \frac{U_v^2}{U_{nOTA}^2} \cdot \frac{S_v}{U_v^2} \\ &= \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{u_{kAB}}{100} + \frac{u_{kAC}}{100} - \frac{u_{kBC}}{100} \right) \cdot \frac{S_v}{S_{nOT}} \quad [p. j.]. \end{aligned}$$

$$x_B = z_B = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{u_{kAB}}{100} + \frac{u_{kBC}}{100} - \frac{u_{kAC}}{100} \right) \cdot \frac{S_v}{S_{nOT}} \quad [p. u.],$$

$$x_C = z_C = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{u_{kAC}}{100} + \frac{u_{kBC}}{100} - \frac{u_{kAB}}{100} \right) \cdot \frac{S_v}{S_{nOT}} \quad [p. u.],$$

kde

$$S_{nOT} = S_{nOTAB} = S_{nOTC} = S_{nOTBC}$$

$$Z_{AB} = \frac{u_{kAB}}{100} \cdot \frac{U_{nOTA}^2}{S_{nOT}}, \quad Z_{AC} = \frac{u_{kAC}}{100} \cdot \frac{U_{nOTA}^2}{S_{nOT}}, \quad Z_{BC} = \frac{u_{kBC}}{100} \cdot \frac{U_{nOTA}^2}{S_{nOT}} \quad [\Omega].$$

Po dosazení

$$x_A = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{u_{kAB}}{100} + \frac{u_{kAC}}{100} - \frac{u_{kBC}}{100} \right) \cdot \frac{S_v}{S_{nOT}} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{8}{100} + \frac{8}{100} - \frac{16}{100} \right) \cdot \frac{1200}{31,5} = 0 \text{ p. u.},$$

$$x_B = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{u_{kAB}}{100} + \frac{u_{kBC}}{100} - \frac{u_{kAC}}{100} \right) \cdot \frac{S_v}{S_{nOT}} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{8}{100} + \frac{16}{100} - \frac{8}{100} \right) \cdot \frac{1200}{31,5} = 3,0476 \text{ p. u.},$$

$$x_C = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{u_{kAC}}{100} + \frac{u_{kBC}}{100} - \frac{u_{kAB}}{100} \right) \cdot \frac{S_v}{S_{nOT}} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{8}{100} + \frac{16}{100} - \frac{8}{100} \right) \cdot \frac{1200}{31,5} = 3,0476 \text{ p. u.}$$

Reaktance zapouzdřených vodičů:

Protože jmenovité napětí zapouzdřených vodičů je zároveň vztažné napětí, platí:

$$x_{ZV} = X_{ZV} \cdot l \cdot \frac{S_v}{U_v^2} = 0,05 \cdot 0,05 \cdot \frac{1200}{10^2} = 0,03 \text{ p. u.}$$

Reaktance náhradního motoru

Všechny motory připojené k přípojnicím jedné rozvodny jsem nahradil jedním náhradním motorem s použitím střední hodnoty poměrných záběrných proudů motorů $i_{z_stř}$ a součtu jejich jmenovitých proudů I_{nM_celk} . Při výpočtu jsem použil hodnoty skutečných AM motorů instalovaných v ETE, které jsou určeny pro jmenovité napětí $U_n = 6 \text{ kV}$. Protože v návrhu pracuji s jmenovitým napětím velkých motorů $U_n = 10 \text{ kV}$, provedl jsem přepočítání jmenovitého proudu I_{nM} motorů na napěťovou hladinu 10 kV při zachování jejich jmenovitého výkonu S_{nM} . Poměrný záběrný proud jednotlivých motorů i_{zM} jsem zachoval původní.

$$x_M \cong z_M = \frac{U_{nM}}{\sqrt{3} \cdot I_{z_celk}} \cdot \frac{S_v}{U_v^2} = \frac{U_{nM}}{\sqrt{3} \cdot i_{z_stř} \cdot I_{nM_celk}} \cdot \frac{S_v}{U_v^2} = \frac{10}{\sqrt{3} \cdot 6,6 \cdot 1,245} \cdot \frac{1200}{10^2} = 8,4315 \text{ p. u.},$$

kde

$$I_{nM_celk} = \sum_1^k I_{nM} = 1,245 \text{ kA}$$

$$i_{z_stř} = \frac{\sum_1^k i_{zM}}{k} = 6,6$$

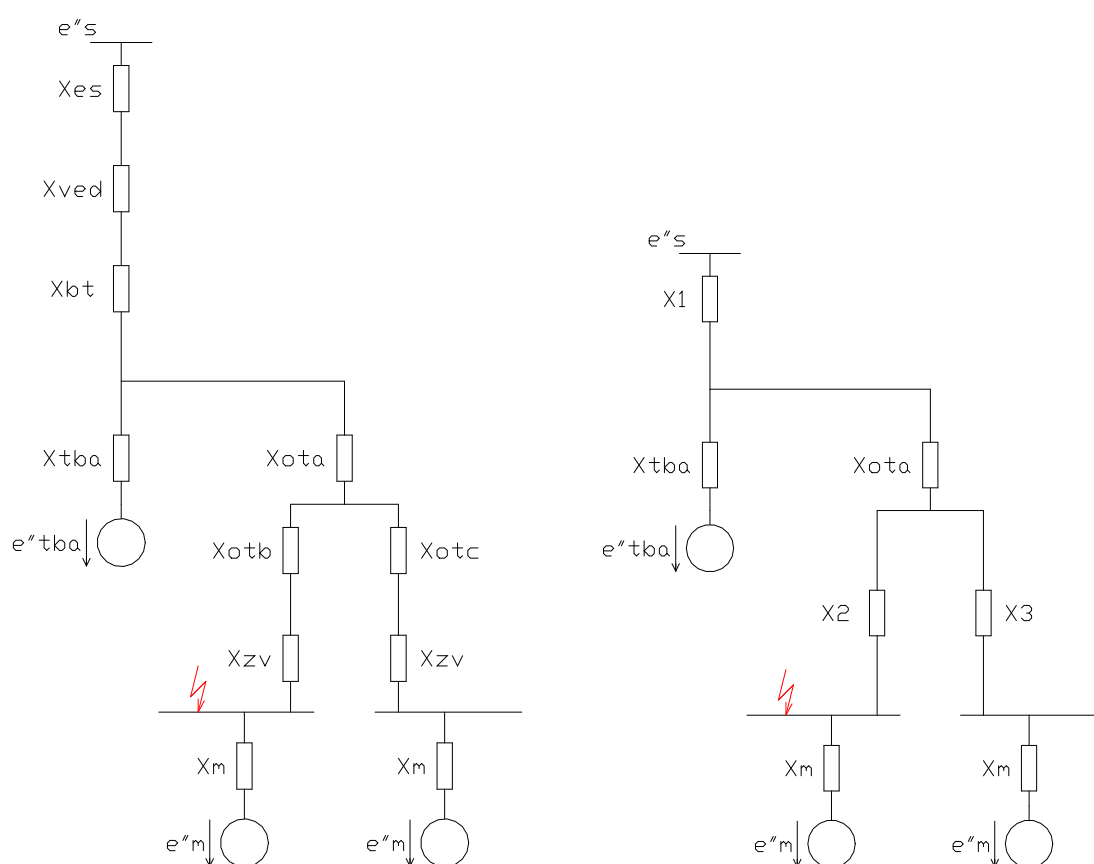
Při výpočtu uvažuji přibližně stejné zatížení rozvodu s připojenými motory, které přispívají ke zkratovému proudu. Proto volím na obou rozvodnách stejné parametry ekvivalentního motoru.

5.5.4 Zjednodušení náhradního schématu

Po určení náhradních reaktancí jednotlivých prvků provedu postupné zjednodušení náhradního schématu.

V prvním kroku sloučím reaktance elektrizační soustavy 400 kV, venkovního vedení a blokového transformátoru do jedné reaktance x_1 a reaktance jednotlivých sekundárních vinutí odbočkového transformátoru s navazujícími zapouzdřenými vodiči do reaktancí x_2 a x_3 .

Původní a částečně zjednodušené náhradní schéma je vyobrazeno na Obr. 21.

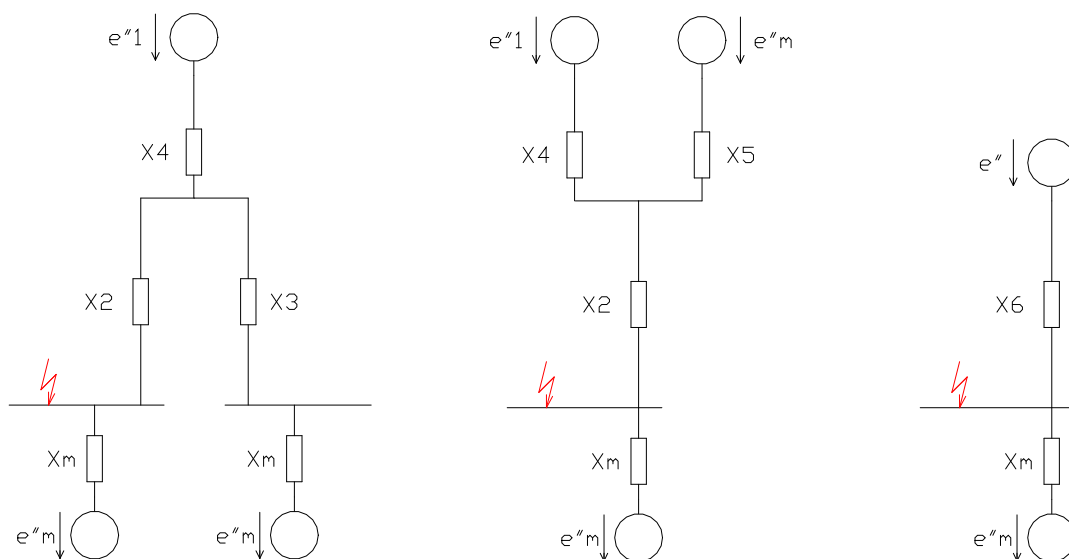


Obr. 21

$$x_1 = x_{es} + x_{ved_{400}} + x_{BT} = 0,042 + 0,0112 + 0,14 = 0,1932 \text{ p. u.}$$

$$x_2 = x_3 = x_{OTb} + x_{ZV} = 3,0476 + 0,03 = 3,0776 \text{ p. u.}$$

Následně sloučím zdroje e''_s a e''_{TBA} a nahradím je zdrojem e''_1 a zároveň sloučím reaktance x_1 , x_{TBA} a x_{OTa} do reaktance x_4 , viz Obr. 22.



Obr. 22

$$e''_1 = \frac{e''_s \cdot x_{TBA} + e''_{TBA} \cdot x_1}{x_{TBA} + x_1} = \frac{1,05 \cdot 0,24 + 1,1 \cdot 0,1932}{0,24 + 0,1932} = 1,0723 \text{ p. u.}$$

$$x_4 = x_{OTa} + \frac{x_1 \cdot x_{TBA}}{x_1 + x_{TBA}} = 0 + \frac{0,1932 \cdot 0,24}{0,1932 + 0,24} = 0,1070 \text{ p. u.}$$

Dále sloučím reaktance x_3 a x_m do reaktance x_5 a tu potom následně s reaktancemi x_2 a x_4 , za současného sloučení zdrojů e''_1 a e''_m do jednoho náhradního zdroje e'' .

$$x_5 = x_3 + x_m = 3,0776 + 8,4315 = 11,5091 \text{ p. u.}$$

$$e'' = \frac{e''_1 \cdot x_5 + e''_m \cdot x_4}{x_4 + x_5} = \frac{1,0723 \cdot 11,5091 + 0,9 \cdot 0,1070}{0,1070 + 11,5091} = 1,0714 \text{ p. u.}$$

$$x_6 = x_2 + \frac{x_4 \cdot x_5}{x_4 + x_5} = 3,0776 + \frac{0,1070 \cdot 11,5091}{0,1070 + 11,5091} = 3,1837 \text{ p. u.}$$

Z takto upraveného náhradního schématu již vypočítám potřebné zkratové proudy.

5.5.5 Určení zkratových proudů

Vztažný proud:

$$I_v = \frac{S_v}{\sqrt{3} \cdot U_v} = \frac{1200}{\sqrt{3} \cdot 10} = 69,28 \text{ kA}$$

Příspěvek náhradního motoru k počátečnímu rázovému zkratovému proudu:

$$i''_{k_m} = \frac{e''_m}{x_m} = \frac{0,9}{8,4315} = 0,1067 \text{ p. u.}$$

$$I''_{k_m} = i''_{k_m} \cdot I_v = 0,1067 \cdot 69,28 = 7,40 \text{ kA}$$

Příspěvek od pracovního napájení a vedlejších rozvodů:

$$i''_{k_{pn}} = \frac{e''}{x_6} = \frac{1,0714}{3,1837} = 0,3365 \text{ p. u.}$$

$$I''_{k_{pn}} = i''_{k_{pn}} \cdot I_v = 0,3363 \cdot 69,28 = 23,30 \text{ kA}$$

Celkové zkratové proudy:

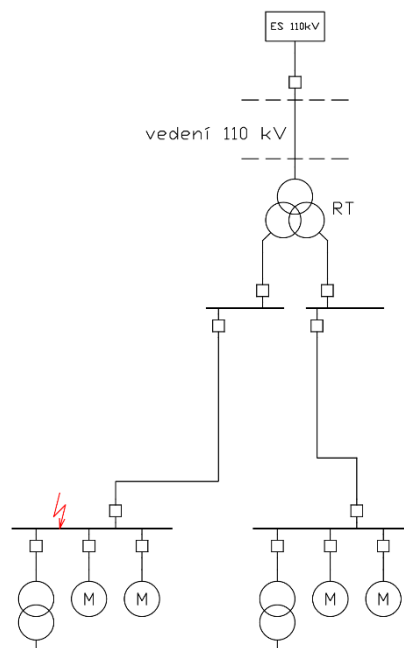
$$I''_k = I''_{k_m} + I''_{k_{pn}} = 7,40 + 23,30 = 30,70 \text{ kA}$$

$$I_p = K \cdot \sqrt{2} \cdot I''_k = 1,8 \cdot \sqrt{2} \cdot 30,70 = 78,14 \text{ kA}$$

kde volím hodnotu koeficientu $K = 1,8$.

5.5.6 Výpočet zkratových poměrů při napájení VS z rezervního zdroje

Způsob výpočtu náhradních reaktancí je shodný s předcházejícím případem s tím rozdílem, že parametry elektrizační soustavy a venkovního vedení se změní tak, aby odpovídaly napájení ze sítě 110 kV. Ve výpočtu se rovněž neuplatní reaktance blokového transformátoru a reaktance turboalternátoru a jeho elektromotorické napětí. Výše popsané je zřejmé z Obr. 23.



Obr. 23

Dále uvedu jen výsledky výpočtů zkratových proudů.

$$I''_{krn} = i''_{krn} \cdot I_v = 0,3175 \cdot 69,28 = 22,00 \text{ kA}$$

$$I''_k = I''_{km} + I''_{krn} = 7,40 + 22,00 = 29,40 \text{ kA}$$

$$I_{prn} = K \cdot \sqrt{2} \cdot I''_k = 1,8 \cdot \sqrt{2} \cdot 30,70 = 74,82 \text{ kA}$$

5.6 Kontrola navržených zdrojů při samonajíždění skupiny elektromotorů

Samonajíždění skupiny elektromotorů je přechodný stav, ke kterému dochází po obnovení napětí na přípojnicích rozvodny, po jeho předchozím výpadku. Aby byl opětovný rozběh motorů úspěšný, nesmí jejich svorkové napětí poklesnout pod $0,65 U_n$.

Kontrolu úbytků napětí na přípojnicích rozvodny při samonajíždění provedu pro dva případy:

- Samonajíždění při napájení přes odbočkový transformátor
- Samonajíždění při napájení přes rezervní transformátor

Kontrolu navržených zdrojů provedu za následujících zjednodušujících předpokladů:

1. Pro výpočet úbytků napětí budu uvažovat pouze reaktance. Rezistance elektrických strojů a vedení v soustavě vvn a vn jsou vzhledem k jejich reaktancím malé a lze je zanedbat.
2. Při výpočtu reaktance motoru na počátku rozběhu předpokládám, že záběrný proud má čistě jalový charakter. Přijetím tohoto předpokladu je do určité míry kompenzováno zanedbání rezistancí strojů a vedení.
3. Neuvažuji s úbytky napětí na přívodech k elektromotorům, protože indukční reaktance kabelů jsou oproti celkové výpočtové reaktanci zanedbatelně malé.
4. Otáčky motorů klesnou při samonajíždění na nulu, tedy skluz $s = 1$. Tento předpoklad vychází ze závislosti impedance vinutí asynchronního motoru na skluzu. Již při poklesu otáček o 20% klesá impedance natolik, že proud tekoucí motorem roste na 80% proudu záběrného a při poklesu otáček o 40% se již proud záběrnému rovná. [4]
5. Napětí na přípojnicích před samonajížděním považuji za konstantní, $u_e = 1$.

Pro výpočet budu uvažovat nejvíc zatíženou sekci s následující skladbou pohonů:

| Název pohonu | výkon P_n [kW] | účinnost $\cos \phi$ | Proud I_n [kA] | Záběrný proud i_z | Zdánlivý výkon S_n [MVA] | Jalový výkon Q [MVA] |
|------------------------------------|---------------------|-------------------------|---------------------|------------------------|----------------------------------|------------------------------|
| Hlavní cirkulační čerpadlo | 8 000 | 0,89 | 0,528 | 9,1 | 9,267 | 4,225 |
| Čerpadlo chladící vody | 7 000 | 0,75 | 0,568 | 5,8 | 9,825 | 6,498 |
| Kondenzátní čerpadlo | 2 000 | 0,913 | 0,134 | 5,9 | 2,282 | 0,931 |
| Pomocné kondenzátní čerpadlo | 200 | 0,84 | 0,015 | 5,6 | 0,255 | 0,138 |
| Další pohony souhrnně | 500 | 0,9 | 0,034 | 5,5 | 0,600 | 0,250 |
| ΣI_n | | | 1,279 | | | |

5.6.1 Samonajíždění při napájení přes odbočkový transformátor:

Výpočet provedu v poměrných jednotkách, s těmito vztažnými veličinami:

$$S_v = S_{nOT} = S_{nRT} = 31,5 \text{ MVA}$$

Celková reaktance všech motorů připojených k jedné sekci:

$$x_{m_celk} = \frac{S_{OT}}{\sum_i i_{zi} \cdot S_{ni}} = \frac{31,5}{159,5} = 0,197 \text{ p. u.}$$

Z výpočtu zkratových proudů je zřejmé, že všechny reaktance kromě reaktance odbočkového transformátoru a reaktance připojených motorů jsou oproti těmto reaktancím malé a lze je zanedbat. Celková reaktance asynchronních motorů je tedy v sérii s reaktancí odbočkového transformátoru a tvoří spolu dělič napětí.

Reaktance odbočkového transformátoru je pak při uvedených vztažných hodnotách

$$x_c = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{u_{kAB}}{100} + \frac{u_{kBC}}{100} - \frac{u_{kAC}}{100} \right) \cdot \frac{S_v}{S_{nOT}} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{8}{100} + \frac{16}{100} - \frac{8}{100} \right) \cdot \frac{31,5}{31,5} = 0,08$$

Napětí na přípojnicích rozvodny je potom:

$$U_{přip} = u_e \cdot \frac{x_{celk}}{x_{OTa} + x_{m_celk}} = 1 \cdot \frac{0,197}{0,08 + 0,197} = 0,711 > 0,65$$

Napětí na přípojnicích rozvodny při samonajíždění je větší než nejméně přípustných 0,65 U_n , není tedy nutné žádné spotřebiče odpojovat.

5.6.2 Samonajždění při napájení přes rezervní transformátor:

Zatímco v předchozím případě bylo možné reaktanci soustavy a vedení k odbočkovému transformátoru zanedbat, při samonajždění přes rezervní transformátor již tato reaktance činí přibližně 10% reaktance odbočkového transformátoru. Proto ji v tomto případě zahrnu do výpočtu.

$$x_{es} = c \cdot \frac{S_v}{S_k} = 1,1 \cdot \frac{31,5}{7500} = 0,00462 \text{ p. u.}$$

$$x_{ved} = X \cdot l \cdot \frac{S_v}{U_n^2} = 0,4091 \cdot \frac{31,5}{110^2} = 0,00533 \text{ p. u.}$$

Napětí na přípojnicích rozvodny je potom:

$$U_{příp} = u_p \cdot \frac{x_{celk}}{x_{es} + x_{OTc} + x_{m_celk}} = 1 \cdot \frac{0,197}{0,00462 + 0,00533 + 0,08 + 0,197} = 0,687 > 0,65$$

Kontrolou jsem se přesvědčil, že ani při samonajždění přes rezervní transformátor není nutné odpinat žádné spotřebiče.

5.7 Kontrola zkratovým výkonem

Skutečný rázový zkratový výkon na přípojnicích vlastní spotřeby je dán vztahem:

$$S_k = \sqrt{3} \cdot U_c \cdot I''_{kMAX} = \sqrt{3} \cdot 10 \cdot 30,70 = 531,7 \text{ MVA}$$

Pokud budeme uvažovat konstantní napětí soustavy $u_s = 1$, je rázový zkratový výkon na přípojnicích VS při samonajždění přes odbočkový transformátor:

$$S_{kSN} = \frac{u_s}{\frac{1}{u_{SN}} - \frac{1}{u_s}} \cdot \sum_{i=1}^m i_{zi} \cdot S_{ni} = \frac{1}{\frac{1}{0,711} - 1} \cdot 159,5 = 392,4 \text{ MVA} < 531,7 \text{ MVA}$$

Při samonajždění přes rezervní transformátor je rázový zkratový výkon na přípojnicích VS:

$$S_{kSN} = \frac{u_s}{\frac{1}{u_{SN}} - \frac{1}{u_s}} \cdot \sum_{i=1}^m i_{zi} \cdot S_{ni} = \frac{1}{\frac{1}{0,687} - 1} \cdot 159,5 = 350,1 \text{ MVA} < 531,7 \text{ MVA}$$

V obou případech je splněna podmínka, že skutečný rázový výkon na přípojnicích vlastní spotřeby je větší než potřebný rázový zkratový výkon pro samonajždění skupiny motorů.

5.8 Spouštění největšího spotřebiče ve vlastní spotřebě

Při návrhu VS je nutné prověřit, že nedojde k nedovolenému úbytku napětí na přípojnicích rozvodny za situace, kdy všechny spotřebiče kromě největšího pracují při jmenovitém zdánlivém výkonu a zároveň dochází k spouštění největšího spotřebiče z klidového stavu. Napětí na přípojnicích vlastní spotřeby nemá v tomto případě poklesnout pod 0,85 Un a nesmí poklesnout pod 0,8 Un.

Výpočet provedu pro nejvíce zatíženou sekci stejně jako při kontrole samonajždění.

Podmínky výpočtu jsou stejné, jako v případě samonajždění.

5.8.1 Kontrola úbytku napětí na přípojnicích VS při spouštění největšího spotřebiče přes OT

Největší spotřebič: HCČ, $P_n = 8000$ kW

Reaktance všech předběžně připojených spotřebičů pracujících na jmenovitém výkonu

$$x_p = \frac{S_{OT}}{\sum_{i=1}^k S_{pni} \cdot \sin \varphi_i} = \frac{S_{OT}}{\sum_{i=1}^k Q_{pni}} = \frac{31,5}{7,818} = 4,029 \text{ p. u.}$$

Záběhová reaktance hlavního cirkulačního čerpadla:

$$x_{zm} = \frac{1}{i_{zm}} \cdot \frac{S_{OT}}{S_{pnm}} = \frac{1}{9,1} \cdot \frac{31,5}{9,267} = 0,378 \text{ p. u.}$$

Výsledná reaktance v okamžiku spouštění největšího spotřebiče

$$x_{SP} = \frac{x_p \cdot x_{zm}}{x_p + x_{zm}} + x_{OT} = \frac{4,029 \cdot 0,378}{4,029 + 0,378} + 0,08 = 0,426 \text{ p. u.}$$

Poměrný úbytek napětí v okamžiku spouštění největšího spotřebiče

$$\Delta u_{sp} = u_e \cdot \frac{x_{OT}}{x_{SP}} = 1 \cdot \frac{0,08}{0,426} = 0,188 < 0,2$$

Kontrola na úbytek napětí vyhověla požadovanému limitu.

5.8.2 Kontrola úbytku napětí na přípojnicích VS při spouštění největšího spotřebiče přes RT

Při kontrole úbytku musíme ještě vzít v úvahu reaktanci soustavy 110 kV zapojenou v sérii s rezervním transformátorem.

$$x_{ES110} = \frac{S_{RT}}{S''_{k110}} = \frac{31,5}{7500} = 0,0042 \text{ p. u.}$$

Celková reaktance potom bude

$$x_{SP} = \frac{x_p \cdot x_{zm}}{x_p + x_{zm}} + x_{OT} + x_{ES110} = \frac{4,029 \cdot 0,378}{4,029 + 0,378} + 0,08 + 0,0042 = 0,430 \text{ p. u.}$$

Poměrný úbytek napětí v okamžiku spouštění největšího spotřebiče

$$\Delta u_{sp} = u_e \cdot \frac{x_{RT} + x_{ES110}}{x_{SP}} = 1 \cdot \frac{0,08 + 0,0042}{0,430} = 0,196 < 0,2$$

I v tomto případě kontrola na úbytek napětí vyhověla požadovanému limitu.

6. Návrh rozvodného zařízení a vypínačů vlastní spotřeby

Z výpočtu zkratových poměrů jsem získal základní údaje pro dimenzování skříňových vn rozváděčů a jejich vypínačů.

Těmito údaji jsou:

- Jmenovitý proud přípojnic, který je určen součtem jmenovitých proudů jednotlivých spotřebičů.

$$I_{np} = 1279 \text{ A}$$

- Počáteční rázový zkratový proud $I''_k = 30,70 \text{ kA}$
- Nárazový zkratový proud $I_p = 78,14 \text{ kA}$

Na základě výše uvedených údajů jsem navrhl použití skříňového rozváděče UniGear ZS1 s vakuovými vypínači VD4 výrobce ABB s těmito parametry:

- Jmenovité napětí $U_n = 12 \text{ kV}$
- Jmenovitý proud přípojnic $I_n = 2000 \text{ A}$
- Jmenovitý krátkodobý výdržný proud (3 s) 50 kA
- Jmenovitý proud vypínače $I_n = 1600 \text{ A}$
- Rázový zkratový proud $I''_k = 40 \text{ kA}$
- Nárazový dynamický zkratový proud $I_p = 100 \text{ kA}$

Navržené zařízení je zobrazeno na Obr. 24.



Obr. 24 Rozváděč UniGear a vypínač VD4

7. Závěr

V úvodu práce jsem shrnul obecné požadavky na návrh vlastní spotřeby klasických tepelných elektráren, které jsem následně doplnil o specifickou problematiku vztahující se na elektrárny jaderné. Stručně jsem popsal požadavky nových legislativních a technických předpisů na energetické napájecí systémy vyžadované pro bezpečný provoz jaderných elektráren. Kromě národních předpisů jsem popsal i požadavky mezinárodní organizace IAEA na napájecí systémy jaderných elektráren.

Na základě rozboru těchto předpisů se domnívám, že nové požadavky vedou k zajištění větší bezpečnosti jaderných elektráren, na druhé straně však vedou k větší složitosti a nákladnosti schémat vlastní spotřeby.

V další části práce jsem se věnoval způsobům a podmínkám převodu napájení vlastní spotřeby z pracovních zdrojů napájení na rezervní zdroje. Přitom jsem se zabýval i přechodnými ději souvisejícími s chováním velkých asynchronních motorů při ztrátě jejich napájení.

V závěrečné praktické části jsem provedl orientační výpočty zkratových a napěťových poměrů ve vlastní spotřebě modelové elektrárny na napěťové hladině 10 kV. Na základě výpočtů jsem navrhl hlavní parametry rozveden a jejich hlavních vypínačů a podle nich vybral odpovídající zařízení.

8. Seznam literatury

- [1] BECKWITH, T., HARTMANN, W., M-4272 Motor Bus Transfer System, Test Results for Fast and In-Phase Transfers. BECKWITH ELECTRIC CO., INC., 2014. Dostupné z: <http://www.beckwithelectric.com/docs/tech-papers/mbt/Hartmann-Beckwith-Test-results-for-fast-and-in-phase-transfers-Oct-2014.pdf>
- [2] ČSN 38 1120 Vlastní spotřeba tepelných elektráren a tepláren
- [3] ČSN IEC 61225 Jaderné elektrárny – Systémy kontroly a řízení důležité pro bezpečnost – Požadavky na elektrické napájení
- [4] DOČEKAL, Antonín, BOUČEK, Stanislav. Elektrárny II: přednášky. Praha: České vysoké učení technické, 1995. ISBN 80-01-01279-4.
- [5] DOLEŽAL, Jaroslav. Jaderné a klasické elektrárny. Praha: České vysoké učení technické, 2011. ISBN 978-80-01-04936-5.
- [6] ERÚ Čtvrtletní zpráva o provozu ES ČR IV. čtvrtletí 2018
- [7] Hodnocení přiměřenosti výrobních kapacit ES ČR do roku 2030. ČEPS, 2018
- [8] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Design of Electrical Power Systems for Nuclear Power Plants, Specific Safety Guide, IAEA Safety Standards Series No. SSG-34. Vienna: IAEA, 2016. ISBN 978–92 –0–109314–1
- [9] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Nuclear Power Reactors in The World. Reference Data Series No. 2. 2018 Edition. Vienna: IAEA, 2018. ISBN 978–92–0–101418–4
- [10] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Safety of Nuclear Power Plants: Design, IAEA Safety Standards Series No. SSR-2/1. Rev. 1. Vienna: IAEA, 2016. ISBN 978–92–0–109315–8
- [11] POWER REACTOR INFORMATION SYSTEM (PRIS), dostupné z: <https://pris.iaea.org/PRIS/home.aspx>
- [12] Státní energetická koncepce ČRO. MPO 2015
- [13] TŮMA, Jiří. Spolehlivost v elektroenergetice. Praha: ČVUT. ISBN 80-239-6483-6
- [14] Vyhláška SÚJB č. 329/2017 Sb., o požadavcích na projekt jaderného zařízení
- [15] Zákon č. 263/2016 Sb., atomový zákon
- [16] KROPÍK, Martin. Bezpečnostní systémy jaderných reaktorů. Praha. České vysoké učení technické, 2016. ISBN 978-80-01-05907-4

9. Seznam použitých zkratek

| | |
|-------|---|
| AC | Střídavý proud |
| AM | Asynchronní motor |
| BT | Blokový transformátor |
| BWR | Vroucí vodou chlazený a moderovaný reaktor |
| ČEPS | Provozovatel přenosové soustavy ČEPS, a.s. |
| ČSN | Česká technická norma |
| DC | Stejnoseměrný proud |
| ERÚ | Energetický regulační úřad |
| ES | Elektrizační soustava |
| ETE | Jaderná elektrárna Temelín |
| FBR | Rychlý množivý reaktor |
| GCR | Plynem chlazený, grafitem moderovaný reaktor |
| HTGR | Vysokoteplotní, plynem chlazený a grafitem moderovaný reaktor |
| I&C | Systém kontroly a řízení |
| IAEA | Mezinárodní agentura pro atomovou energii (MAAE) |
| JE | Jaderná elektrárna |
| JZ | Jaderné zařízení |
| LGWR | Vodou chlazený, grafitem moderovaný reaktor |
| MPO | Ministerstvo průmyslu a obchodu |
| nn | Nízké napětí |
| OT | Odbočkový transformátor |
| OZE | Obnovitelné zdroje energie |
| PEZ | Primární energetické zdroje |
| PHWR | Tlakovou těžkou vodou chlazený a moderovaný reaktor |
| p. u. | Poměrná jednotka |
| PWR | Tlakovou vodou chlazený a moderovaný reaktor |
| SEK | Státní energetická koncepce České republiky |
| SÚJB | Státní ústav pro jadernou bezpečnost |
| UPS | Zdroj nepřerušovaného napájení (uninterruptible power supply) |
| vn | Vysoké napětí |
| VS | Vlastní spotřeba |
| vvn | Velmi vysoké napětí |