

Analýza regulačných schopností generátorov jadrovej elektrárne po výmene budenia

Anton Belán
Žaneta Eleschová
František Janíček

Prenosová sústava Slovenskej republiky je rozdelená do regulačných zón. V každej zóne sa reguluje napätie len jedného uzla, tzv. „pilotného uzla“, ktorý je vybraný tak, aby zmena napätia v tomto uzle bola určujúca pre vývoj napätia v celej regulačnej zóne. Hodnoty napätí v pilotných uzloch siete 400 a 220 kV sú stanovené pre jednotlivé mesiace v mesačnej príprave režimov elektrizačnej sústavy na základe režimového výpočtu ustáleného chodu siete. Požiadavky na reguláciu napätia v elektrizačnej sústave Slovenskej republiky sú stanovené v Prevádzkovej inštrukcii č. 433 - 1, ktorá uvádza hlavné zásady a prostriedky regulácie napätia a reaktančného výkonu v prenosovej sústave. Na základe vykonaných simulácií na modeli elektrizačnej sústavy Slovenskej republiky sú v príspevku analyzované možnosti rozšírenia regulačných schopností elektrického 3. bloku jadrovej elektrárne V2 v Jaslovských Bohuniciach v oblasti podbudenia generátorov a dopad takejto prevádzky na blokový transformátor, samotný generátor a vlastnú spotrebu bloku.

Úvod

Napätie, ako ukazovateľ kvality elektrickej energie, má na rozdiel od frekvencie lokálny charakter a je ovplyvňované v celom prenosovom reťazci, od zdroja až k spotrebiteľovi. Na úrovni prenosovej sústavy sa hodnotí ako parameter, ktorý súvisí so spoľahlivosťou, bezpečnosťou a ekonomikou prevádzky, pričom na strane spotrebiteľa vystupuje ako kvalitatívny ukazovateľ.

Vzhľadom na dovoľené odchýlky napätia u spotrebiteľov a minimalizáciu strát v prenosoch, je potrebné udržiavať napätie v uzloch sústavy v dovoľenom rozsahu.

Regulácia napätia sa robí na základe režimového výpočtu a vyžaduje v sústave určitú rezervu reaktančného výkonu. Režimový výpočet zahŕňa konfiguráciu siete, nasadenie zdrojov a kompenzačných prostriedkov.

Zmena odberu alebo dodávky reaktančného výkonu úzko súvisí s reguláciou napätia a so stabilitou chodu sústavy.

Kvalitne realizovaný a prevádzkovaný systém regulácie napätí a reaktančných výkonov nesie so sebou výhody nielen pre prevádzkovateľa prenosovej sústavy (vo forme nižších nákladov na prenos, na obsluhu zariadení a zvýšenie bezpečnosti prevádzky), ale aj spotrebiteľom prináša vyššiu kvalitu dodávanej energie.

Prostriedkami na reguláciu U a Q [2], ktoré môžeme využívať na zabezpečenie požadovaného napätia, sú:

1. Zmena budenia elektrární, t. j. zmena reaktančného výkonu jednotlivých generátorov v rámci povolených limitov prevádzkového PQ diagramu, pričom:
 - kladná hodnota budenia je obmedzená maximálnym statorovým a rotorovým

- prúdom a maximálnym povoleným napätím na svorkách generátora,
 - záporná hodnota budenia je obmedzená minimálnym dovoľeným napätím na svorkách generátora a rezervou pre statickú a dynamickú stabilitu.
2. Zmena prevodu regulačných transformátorov 400/220 kV, 400/110 kV, 220/110 kV:
 - tu platí priorita dodržania hodnoty napätia 110 kV na strane transformátora aj pri nedodržaní predpísaných napätí v pilotných uzloch.
 3. Použitie kompenzačných prostriedkov (tlmiviek, kondenzátorových batérií).
 4. Kompenzačná prevádzka vodných elektrární.

V rámci riešenia danej problematiky bolo namodelovaných viacero možných prevádzkových stavov bloku elektrárne, cieľom ktorých bolo určiť:

- minimálnu úroveň napätia pre trvalú prevádzku blokového transformátora a generátora na menovitom výkone a pri menovitej frekvencii,
- vykonať kontrolu dopadu prevádzky bloku pri minimálnej napäťovej úrovni na vlastnú spotrebu,
- navrhnuť prevádzkovú oblasť generátora a blokového transformátora.

V príspevku je analyzovaný aj dopad prevádzky bloku elektrárne pri minimálnej napäťovej úrovni na vlastnú spotrebu. Bola vykonaná kontrola napäťových pomerov na 6 kV rozvodniach vlastnej spotreby 3. bloku, ktorá sa zamerala na to, aby pri minimálnej úrovni napätia generátora $0,95 U_n$ a odoberanom výkone vlastnou spotrebou sa najväčšie motory vo vlastnej spotrebe bezpečne rozbehli, a aby napätie na prípojniciach nekleslo pod hranicu $0,7 U_n$.

1. Technické podmienky prevádzky generátorov a blokových transformátorov pri menovitej frekvencii

1.1 Prevádzka generátorov pri nominálnej frekvencii

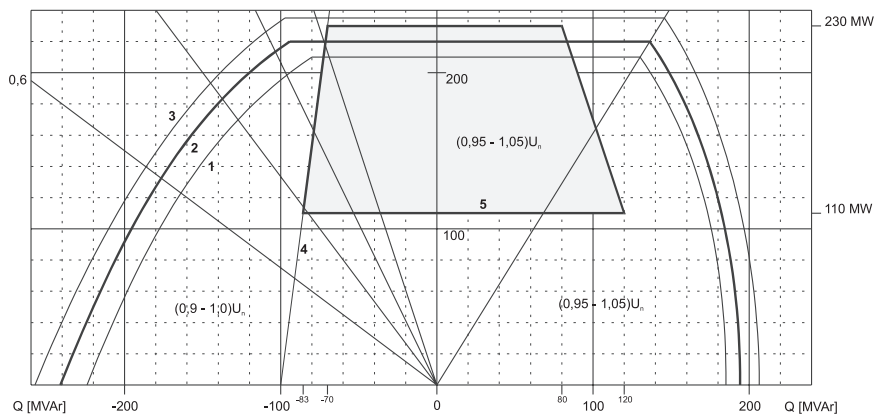
Podľa prevádzkového predpisu normálna prevádzka generátorov je prevádzka s menovitými hodnotami elektrických veličín generátora, ktoré uvádza výrobca generátora. Pritom musia byť dodržané aj predpísané parametre chladiaceho vodiča a chladiaceho kondenzátu. Pri znížení výkonu je možné znížiť aj tlak vodiča. Táto prevádzka je daná prevádzkovým diagramom generátorov. Pre generátory je prevádzkový diagram uvedený na obr. 1. Napätie generátorov môže kolísať o $\pm 5\%$ U_n pri plnom výkone stroja.

1.2 Prevádzka blokových transformátorov pri nominálnej frekvencii

V prevádzkovom predpise sa pre blokový transformátor žiadne limity a podmienky neuvádzajú. Vzhľadom na to, že sa pre blokový transformátor tieto limity a podmienky neuvádzajú, vychádzali sme pri stanovovaní obmedzujúcich podmienok práce blokových transformátorov z STN 35 1100 a STN IEC 354 (35 1106).

V zmysle týchto noriem musia blokové transformátory vyhovovať nasledovným podmienkam:

1. Transformátory musia byť schopné dávať trvalo menovitý výkon pri napätí líšiacom sa od menovitého o $\pm 5\%$ U_n .
2. Olejové transformátory musia byť zhotovené na trvalé zaťaženie vinutí prúdom, ktorý prekračuje menovitú hodnotu prúdu o 5 %, ak napätie ani na jednom



- 1 – tlak vodíka 300 kPa;
- 2 – tlak vodíka 400 kPa, max. teplota chladiacej vody do chladiča vodíka 36 °C, kondenzátu 42 °C;
- 3 – tlak vodíka 400 kPa, max. teplota chladiacej vody do chladiča vodíka 33 °C, kondenzátu 39 °C;
- 4 – nastavenie strážcu hranice podbudenia;
- 5 – prevádzka v dialkovej regulácii napätia

Obr.1 Prevádzkový diagram turbogenerátora 259 MVA

z vinutí neprekročí menovité napätie. Pritom výkon transformátora nesmie byť vyšší ako menovitý.

3. Transformátory s napätím 110 kV a vyšším dovoľujú trvalý chod pri napätí na ľubovoľnej odbočke ľubovoľného vinutia o 10 % vyššom, ako je menovité napätie danej odbočky. Pritom napätie na ľubovoľnom vinutí nesmie prekročiť najvyššie pracovné napätie podľa STN 33 0120.

2. Simulovanie prevádzkových stavov 3. bloku jadrovej elektrárne V2

Jedným z prostriedkov na reguláciu napätia a reaktančného výkonu v elektrizačnej sústave, ktorý môžeme využívať na zabezpečenie požadovaného napätia, je zmena budenia synchronných strojov, t. j. zmena reaktančného výkonu jednotlivých generátorov v rámci povolených hraníc prevádzkového diagramu PQ. Jedným z pilotných uzlov prenosovej sústavy 400 kV je rozvodňa Bošáca. Do tejto rozvodne je vyvedený výkon 3. bloku jadrovej elektrárne V2 Jaslovské Bohunice. Na regulácii napätia v rozvodni Bošáca slúžia turbogenerátory TG31 a TG32 bloku 3. Vzhľadom na veľký počet zrealizovaných simulácií sú v príspevku uvedené len niektoré najpodstatnejšie výsledky.

1. modelovaný stav

- TG31 a TG32 s vyrábaným nominálnym činným výkonom 220 MW,
- regulované napätie na rozvodni Bošáca (požadovaná hodnota 412 kV),
- vlastná spotreba bloku je napájaná cez transformátory 1BT01 a 1BT02,
- na TG31 bol postupne menený reaktančný výkon (od hodnoty -5 MVar až po hranicu možného podbudenia -70 MVar),
- TG32 reguloval svoj reaktančný výkon v závislosti od hodnoty napätia na rozvodni Bošáca.

V predposlednej simulácii sme obidvom generátorom vnútili maximálne podbude-

nie (-70 MVar). V tomto prípade však hodnota napätia na rozvodni Bošáca bola nižšia ako požadovaná hodnota 412 kV. V poslednej simulácii sme nechali obidva generátory regulovať reaktančný výkon v závislosti od napätia na rozvodni Bošáca.

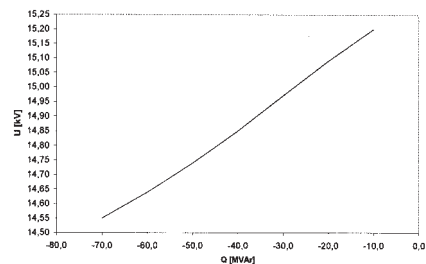
Prúdy generátorov, prúdy blokových transformátorov 1AT01 a 1AT02 na strane ZVN aj VN a ich celkové činné straty ani v jednom prípade nepresiahli nominálne hodnoty. Najnižšia hodnota napätí generátorov bola 0,906 U_n , dosiahnutá bola pri vnútenom maximálnom podbudení (-70 MVar) na obidvoch generátoroch.

2. modelovaný stav

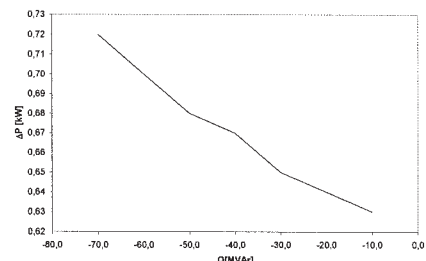
- TG31 a TG32 s vyrábaným nominálnym činným výkonom 220 MW,
- regulované napätie na rozvodni Bošáca (požadovaná hodnota 412 kV),
- transformátory 1BT01 a 1BT02 sú vypnuté – vlastná spotreba bloku je napájaná cez rezervné transformátory,
- na TG31 bol postupne menený reaktančný výkon (od hodnoty -10 MVar až na hranicu možného podbudenia -70 MVar),
- TG32 sme nechali regulovať svoj reaktančný výkon v závislosti od hodnoty napätia na rozvodni Bošáca.

V predposlednej simulácii sme obidvom generátorom vnútili maximálne podbudenie (-70 MVar). V tomto prípade však hodnota napätia na rozvodni Bošáca bola nižšia ako požadovaná hodnota 412 kV. V poslednej simulácii sme nechali obidva generátory regulovať reaktančný výkon v závislosti od napätia na rozvodni Bošáca.

Prúdy generátorov, činné straty na blokových transformátoroch 1AT01 a 1AT02 ani v jednom prípade nepresiahli nominálne hodnoty. Najnižšia hodnota napätí generátorov bola 0,914 U_n , dosiahnutá bola pri vnútenom maximálnom podbudení (-70 MVar) na obidvoch generátoroch. V tomto prípade bol však prekročený no-



Obr.2 Závislosť napätia TG31 od podbudenia



Obr.3 Závislosť činných strát na transformátore 1AT01 od podbudenia TG31 pri nominálnom činnom výkone 220 MW

minálny prúd blokových transformátorov 1AT01 a 1AT02 na strane VN aj ZVN.

3. modelovaný stav

- TG31 a TG32 s vyrábaným činným výkonom 220 MW,
- regulované napätia na generátoroch TG31 a TG32 postupne na hodnoty 0,95 - 0,9 U_n ,
- transformátory 1BT01 a 1BT02 sú vypnuté – vlastná spotreba bloku je napájaná cez rezervné transformátory.

Nominálne hodnoty prúdov generátorov a celkové nominálne činné straty blokových transformátorov neboli prekročené ani v jednom prípade.

Najnižšia hodnota napätí generátorov bola 0,914 U_n , dosiahnutá bola pri maximálnom podbudení (-70 MVar) na obidvoch generátoroch. V tomto prípade bol však prekročený nominálny prúd blokových transformátorov 1AT01 a 1AT02 na VN aj ZVN strane.

4. modelovaný stav

- TG31 a TG32 s vyrábaným činným výkonom 220 MW,
- regulované napätia na generátoroch TG31 a TG32 postupne na hodnoty 0,95 - 0,9 U_n ,
- vlastná spotreba bloku je napájaná cez transformátory 1BT01 a 1BT02.

Prúdy generátorov, prúdy cez blokové transformátory 1AT01 a 1AT02 na strane ZVN aj VN a celkové činné straty ani v jednom prípade nepresiahli nominálne hodnoty.

Najnižšia hodnota napätí generátorov bola 0,906 U_n , dosiahnutá bola pri maximálnom možnom podbudení (-70 MVar) na obidvoch generátoroch.

5. modelovaný stav

- TG31 a TG32 s vyrábaným činnom výkonom 220 MW,
- regulované napätia na generátoroch TG31 a TG32 postupne na hodnoty $0,95 - 0,9 U_n$,
- namodelovaný mimoriadny stav v elektrizačnej sústave – bolo vnútené vysoké napätie v sústave (vypnutie tlmiviek, prebudené ostatné generátory),
- vlastná spotreba bloku je napájaná cez transformátory 1BT01 a 1BT02.

Prúdy generátorov, prúdy cez blokové transformátory 1AT01 a 1AT02 na strane ZVN aj VN a celkové činné straty ani v jednom prípade nepresiahli nominálne hodnoty.

Najnižšia hodnota napätí generátorov bola $0,918 U_n$, dosiahnutá bola pri maximálnom možnom podbudení (-70 MVar) na oboch generátoroch.

6. modelovaný stav

- TG31 a TG32 s vyrábaným činnom výkonom 220 MW,
- regulované napätia na generátoroch TG31 a TG32 postupne na hodnoty $0,95 - 0,9 U_n$,
- namodelovaný mimoriadny stav v elektrizačnej sústave – bolo vnútené vysoké napätie v sústave (vypnutie tlmiviek, prebudené ostatné generátory),
- transformátory 1BT01 a 1BT02 sú vypnuté – vlastná spotreba bloku je napájaná cez rezervné transformátory.

Prúdy generátorov, prúdy cez blokové transformátory 1AT01 a 1AT02 na strane ZVN aj VN a celkové činné straty ani v jednom prípade nepresiahli nominálne hodnoty.

Najnižšia hodnota napätí generátorov bola $0,926 U_n$, dosiahnutá bola pri maximálnom možnom podbudení (-70 MVar) na oboch generátoroch.

7. modelovaný stav

- TG31 s vyrábaným činnom výkonom 230 MW,
- TG32 – vypnutý,
- regulované napätia na generátore TG31 postupne na hodnoty $0,95 - 0,9 U_n$,
- transformátory 1BT01 a 1BT02 sú vypnuté – vlastná spotreba bloku je napájaná cez rezervné transformátory.

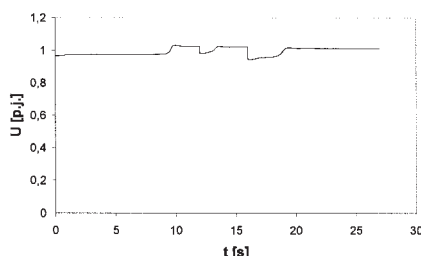
Simulované stavy, keď sa regulovalo napätie generátorov na hodnoty $0,9 - 0,94 U_n$, sú z hľadiska neprekročenia nominálnej hodnoty prúdu blokového transformátora 1AT01 na strane VN aj ZVN a celkových činných strát, nevyhovujúce. Prúd generátora nebol prekročený ani v jednej simulácii.

Najnižšia úroveň napätia generátora dosiahla hodnotu $0,93 U_n$.

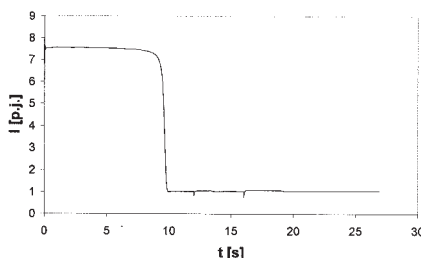
8. modelovaný stav

- TG31 s vyrábaným činnom výkonom 230 MW,
- TG32 – vypnutý,
- regulované napätia na generátore TG31 postupne na hodnoty $0,95 - 0,9 U_n$,
- vlastná spotreba bloku je napájaná cez transformátory 1BT01 a 1BT02.

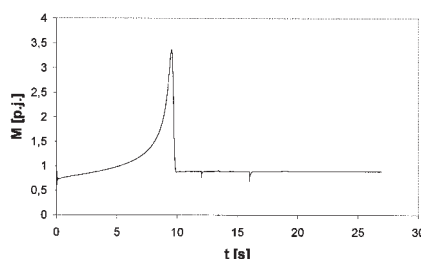
Prúd cez blokový transformátor 1AT01 na strane ZVN a celkové činné straty ani



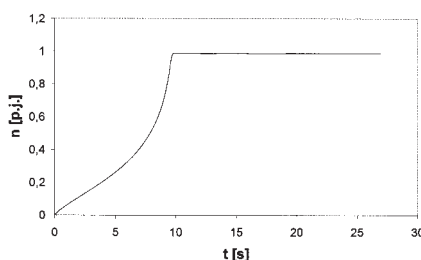
Obr.4 Časový priebeh napätia motora HCČ počas simulácie



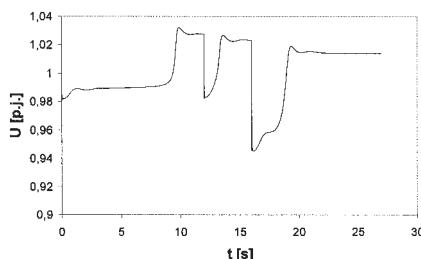
Obr.5 Časový priebeh prúdu motora HCČ počas simulácie



Obr.6 Časový priebeh momentu motora HCČ počas simulácie



Obr.7 Časový priebeh otáčok motora HCČ počas simulácie



Obr.8 Časový priebeh napätia na rozvodni 1BB počas simulácie

v jednom prípade nepresiahli nominálne hodnoty. Menovitý prúd blokového transformátora na strane VN bol prekročený pri regulovaní napätia generátora na hodnoty $0,94 - 0,9 U_n$.

Najnižšia úroveň napätia generátora dosiahla hodnotu $0,923 U_n$, v tomto prípade však bol prekročený aj menovitý prúd generátora.

3. Kontrola dopadu prevádzky bloku na minimálnej napäťovej úrovni na vlastnú spotrebu

Kontrola napäťových pomerov na 6 kV rozvodniach vlastnej spotreby 3. bloku bola zameraná na to, aby pri minimálnej úrovni napätia generátora a odoberanom výkone vlastnou spotrebou sa najväčšie motory vo vlastnej spotrebe bezpečne rozbehli a napätie na pripojniciach nekleslo pod $0,7 U_n$.

Pre modelovanie sme vybrali rozbeh motorov napájaných z rozvodne 1BB (čerpadlo chladiacej vody BQDV, napájacie čerpadlo NČ, hlavné cirkulačné čerpadlo HCČ).

Samotná simulácia spočívala v postupnom spúšťaní vybraných pohonov. Ako prvé bolo spustené hlavné cirkulačné čerpadlo, druhé napájacie čerpadlo (v 12. sekunde) a ako tretie čerpadlo chladiacej vody (v 16. sekunde).

Ako príklad výsledku simulácií uvádzame časové priebehy napätia, prúdu, otáčok a momentu motora HCČ a časový priebeh napätia na rozvodni 1BB na obr. 4 – 8.

Simulované časové priebehy prúdov počas rozbehov motorov približne korešpondujú s nameranými časovými priebehmi. Na základe tohto môžeme predpokladať, že rozbeh motorov bol namodelovaný správne.

Ako je zrejme s uvedených časových priebehov, napätie na rozvodniach vlastnej spotreby 3. bloku jadrovej elektrárne V2 počas simulácie rozbehov nekleslo pod hodnotu $0,7 U_n$.

Záver

Z vykonaných experimentov vyplýva, že obmedzujúcim kritériom práce bloku elektrárne v podbudenom stave pri menovitej frekvencii nemôže byť jednoznačne iba úroveň napätia generátora. Z uvedených záverov pri jednotlivých experimentoch vyplýva, že je potrebné kontrolovať hodnoty prúdov generátora, blokového transformátora na strane VN aj ZVN.

Pri prevádzke bloku na menovitom činnom výkone 220 MW a vlastnej spotrebe napájanej cez odbočkové transformátory 1BT01 a 1BT02 je prevádzka aj pri maximálnom podbudení oboch generátorov možná z hľadiska dodržania nominálnych hodnôt prúdov generátorov a blokových transformátorov a ich celkových činných strát. Ale

v prípade, že by nastala zmena v konfigurácii siete (napájanie vlastnej spotreby, výpadok jedného z generátorov alebo výraznej zmeny napätových pomerov v elektrizačnej sústave), môže dôjsť k prekročeniu nominálnych hodnôt.

Pre celkové využitie regulačných schopností generátorov môže napätie generátorov dosahovať hodnotu $0,9 U_n$, avšak je potrebné zabezpečiť, aby hodnoty prúdov generátorov a blokových transformátorov na strane VN aj ZVN neprekročili nominálne hodnoty.

Pri minimálnej napätovej úrovni generátora boli simulované rozbehy vybraných motorov. Ako je zrejmé s uvedených časových priebehov v kapitole 3, napätie na rozvodniach vlastnej spotreby 3. bloku jadrovej elektrárne V2 počas simulácie rozbehov nekleslo pod hodnotu $0,7 U_n$.

Literatúra

[1] KOLCUN, M.: Riadenie elektrizačných sústav. Skriptum ES VŠT, Košice 1988.

[2] ALTUS, J., NOVÁK, M.: Riadenie elektrizačnej sústavy. VŠDS, Žilina 1995.

[3] ANDERSON, P. M., FOUAD, A. A.: Power System Control and Stability. USA, IEEE Press 1994.

[4] GRÍGER, V.: Regulovanie elektrizačnej sústavy podľa pravidiel UCPT. Zborník Infoenergo 98: „Odborné informácie v energetike“. Liptovský Ján 1998.

[5] BAŠTA, J., CHLÁDEK, J., MAYER, I.: Teorie elektrických strojů. Bratislava, SN-TL/ALFA 1968.

[6] STN 35 1100 Výkonové transformátory.

[7] STN IEC 354 (35 1106) Návod na zaťažovanie olejových výkonových transformátorov.

Príspevok vznikol v rámci riešenia grantu 1/7604/20.

Anton Belán
Žaneta Eleschová
František Janíček

STU FEI
Ilkovičova 3
812 19 Bratislava
e-mail: