

Vladimír Krištof, Stanislav Kušnír, Daniel Hlubeň, Michal Kolcun

Modelovanie prechodných javov v PSLF

V praxi sa často vyskytujú stavy, ktoré sa líšia od normálnych prevádzkových podmienok elektrizačnej sústavy. Jedná o také stavy, ktoré pre svoj charakter či iné dôvody, nie je možné pre potreby analýzy sústavy realizovať na skutočných zariadeniach. Z toho dôvodu sa v praxi využívajú na tento účel rôzne podporné softvérové prostriedky založené na princípe matematického modelovania elektrickej siete. Vytvorené modely umožňujú sledovať a následne analyzovať vlastnosti siete pri rôznych prevádzkových či poruchových stavoch. Jedným z takýchto programových nástrojov je aj program PSLF (Positive Sequence Load Flow).

I. ÚVOD

Základným prevádzkovým stavom každej elektrizačnej sústavy je jej ustálený chod spočívajúci v rovnovážnom stave prevádzkových (stavových elektrických a mechanických) veličín systému. Ľubovoľná zmena prevádzkových parametrov systému má za následok narušenie ustáleného chodu, teda rovnovážneho stavu, v dôsledku čoho vzniká prechodný jav. Prechodné javy v elektrizačných sústavách vznikajú vždy pri prechode z jedného ustáleného stavu do nového ustáleného stavu [1]. PSLF je program od amerického výrobcu General electric. Je možné v ňom modelovať v režime „Edit“ (funguje na báze tabuľkového editora) alebo pomocou príkazového riadku. Umožňuje namodelovať všetky prvky elektrizačnej sústavy, vrátane regulátorov, budenia generátorov, elektrických ochrán a pod. PSLF je určený na komplexnú analýzu elektrizačných sústav. V užívaní ho majú viacerí prevádzkovatelia prenosových sústav aj v Európe, mimo iných aj SEPS a.s. (Slovenská elektrizačná a prenosová sústava).

II. ROZDELENIE PRECHODNÝCH JAVOV

Prechodný jav chápeme ako časovú zmenu, pri ktorej sa mení určité množstvo energie viazané k danému elektrickému alebo elektromechanickému obvodu na inú formu energie, preto sa nemôže takýto jav uskutočniť skokom, ale podľa platných fyzikálnych zákonov popisujúcich tieto deje. Z tohto hľadiska môžeme rozdeliť prechodné javy na vlnové (napr. atmosférické prepätia, majú trvanie v mikrosekundách až milisekundách), elektromagnetické (napr. skraty, trvanie rádovo od 0,1s až do 5 sekúnd) a elektromechanické (napr. kývanie výkonu, trvanie rádovo od desiatín sekundy až po niekoľko sekúnd) [3]. V tomto článku sa zameriame hlavne na druhú a tretiu skupinu prechodných javov, t.j. na javy elektromagnetické a elektromechanické.

III. MODELOVANIE ELEKTROMAGNETICKÝCH PRECHODNÝCH JAVOV V PSLF

Najčastejšou príčinou vzniku elektromagnetických prechodných javov v sústave sú skraty, zemné spojenia, vznik miestnej prúdovej a napäťovej nesymetrie, nárazové budenie synchronných strojov [3]. V tejto kapitole sa budeme venovať modelovaniu najčastejšie sa vyskytujúcich elektromagnetických prechodných javov - skratom. Pod skratom rozumieme náhodné alebo úmyselné vodivé spojenie medzi dvoma fázami alebo fázami a zemou vedúce k tomu, že rozdiel elektrických potenciálov medzi týmito vodivými časťami sa rovná nule alebo má hodnotu blízku nule[4]. Program PSLF umožňuje

výpočet všetkých typov skratov (kovových, nekovových, oblúkových) a zemných spojení. Predpokladáme sústavu so štyrmi generátormi prepojenými jednoduchým systémom vedení podľa obr. 1. Parametre sústavy sú nasledovné:

Generátory: $U_n = 20$ kV, $P_n = 900$ MW, $x_d = 1,8$, $x_q = 1,7$, $x'_d = 0,3$, $x'_q = 0,55$, $x''_d = 0,25$, $x''_q = 0,25$, $x_l = 0,2$, $r_a = 0,002$, $T'_d = 8$ s, $T'_q = 0,4$ s, $T''_d = 0,03$, $T''_q = 0,05$, $T_f = 13$ s.

Kde:

U_n – menovitá hodnota napätia generátora

P_n – menovitý výkon generátora

x_d – pozdĺžna synchronná reaktancia

x'_d – pozdĺžna prechodná reaktancia

x''_d – pozdĺžna rázová reaktancia

x_q – priečna synchronná reaktancia

x'_q – priečna prechodná reaktancia

x''_q – priečna rázová reaktancia

T'_d – pozdĺžna prechodná časová konštanta

T''_d – pozdĺžna rázová časová konštanta

T'_q – priečna prechodná časová konštanta

T''_q – priečna rázová časová konštanta

T_f – jednosmerná časová konštanta statora

Transformátory: $U_{nh} = 230$ kV, $U_n = 20$ kV $S_n = 1200$ MVA, $R = 0.0018$ p.j., $X = 0.025$ p.j., $B = -0.0054$ p.j.

Kde:

U_n – sekundárne napätie transformátora

U_{nh} – sekundárne napätie transformátora

S_n – menovitý zdánlivý výkon transformátora

R – celková rezistencia transformátora (v pomerných jednotkách)

X – celková reaktancia transformátora (v pomerných jednotkách)

B – celková susceptancia transformátora (v pomerných jednotkách)

Vedenia:

W1, W6 : $U_n = 220$ kV, $R = 0.002$ p.j., $X = 0.025$ p.j., $B = 0.0043$ p.j.

W2, W5 : $U_n = 220$ kV, $R = 0.001$ p.j., $X = 0.010$ p.j., $B = 0.0017$ p.j.

W3, W4 : $U_n = 220 \text{ kV}$, $R = 0.022 \text{ p.j.}$, $X = 0.220 \text{ p.j.}$, $B = 0.385 \text{ p.j.}$

Kde:

- U_n – menovité napätie vedenia
- R – rezistancia vedenia (v pomerných jednotkách)
- X – reaktancia vedenia (v pomerných jednotkách)
- B – susceptancia vedenia (v pomerných jednotkách)

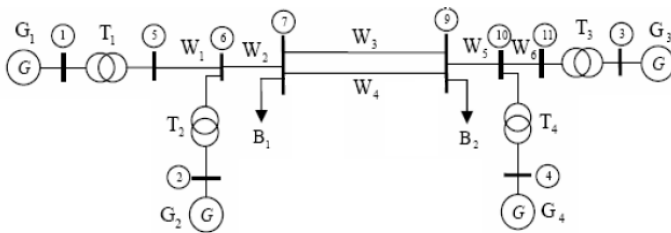
Záťaže:

$$S_{B1} = 967 + j100 \text{ MVA}$$

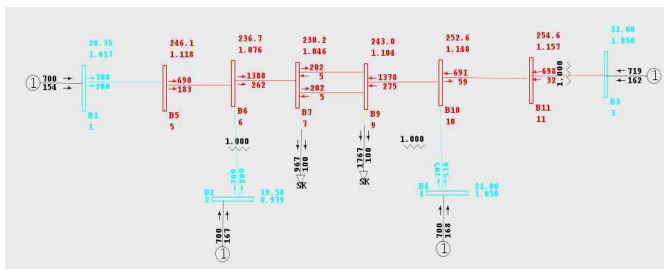
$$S_{B2} = 1767 + j100 \text{ MVA}$$

Kde:

S_B – spotrebovaný výkon záťaže

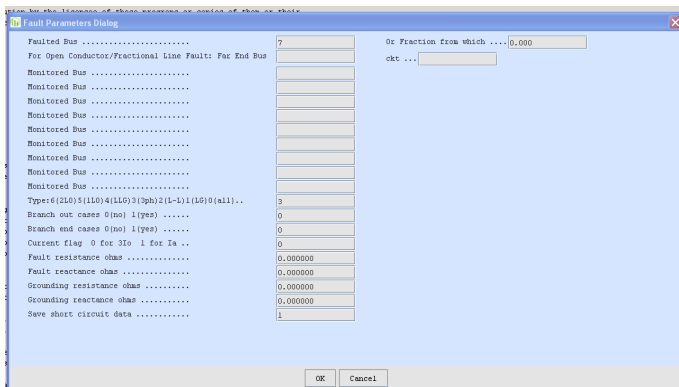


Obr. 1. Model sústavy.



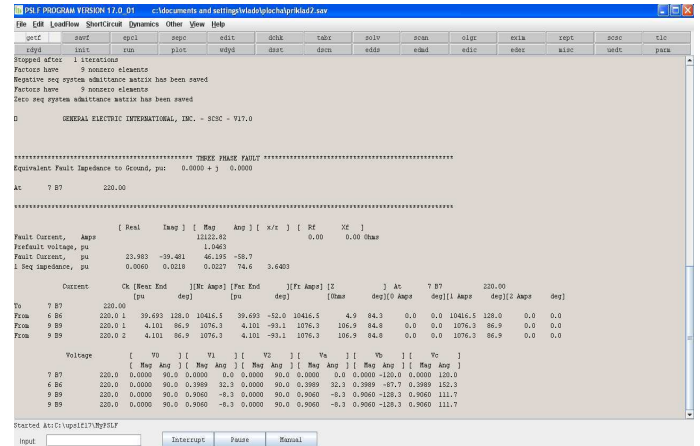
Obr. 2. Model sústavy namodelovanej v programe PSLF

Na obr. 2 je možné vidieť namodelovanú sústavu v grafickom prostredí PSLF. Predpokladajme, že došlo ku kovovému trojfázovému skratu na prípojnici č.7.



Obr. 3. Menu nastavenia podmienok pre výpočet skratu.

Program dáva možnosť v menu nastavenia podmienok pre výpočet skratu zadať miesto skratu, typ skratu resp. zemného spojenia, čas trvania skratu, monitorované prípojnice (pre priebeh napätí, prúdu, frekvencie na žiadanej prípojnici). V prípade ak by sa uvažoval oblúkový skrat je možné takisto zadať aj impedanciu oblúka.



Obr. 4. Vypis výsledkov výpočtu skratu na prípojnici č.7.

Vzhľadom na to, že niektoré údaje (napr. R , X , B) sa do PSLF musia zadávať v pomerných jednotkách, je aj výsledná hodnota súmerného rázového skratového prúdu I''_k (v našom prípade I''_{k3}) uvedená v pomerných jednotkách. Je dôležité poznamenať, že pri prepočte na pomerné jednotky sa za vzťažný výkon volí vždy hodnota $S_v = 100 \text{ MVA}$, a hodnota vzťažného napätia U_v je volená podľa napätia sústavy (v našom prípade $U_n = 220 \text{ kV}$). V tab. 1 sú uvedené výsledky výpočtu skratového prúdu v programe PSLF, aj výpočtu podľa normy STN IEC 60909.

TABUĽKA I
Porovnanie výsledkov výpočtu skratového prúdu v mieste poruchy

Prúd	Výpočet podľa STN IEC 60909	Výpočet v PSLF	Odchýlka
I''_{k3} (kA)	12,6	12,21	-3,09 %

Odchýlka bola vypočítaná podľa vzorca :

$$D = \frac{I_{kb} - I_{ka}}{I_{ka}} \cdot 100\% \quad (1)$$

Kde:

I_{kb} - je hodnota vypočítaná programom PSLF

I_{ka} – je vzťažná hodnota (hodnota vypočítaná podľa STN IEC 60909)

Odchýlka vo výpočte je spôsobená tým, že výpočet podľa normy STN IEC 60909 bol uvažovaný aj s korekčnými činiteľmi, ktoré predpisuje táto norma, zatiaľ čo PSLF tieto činitele neuvažuje. Podľa normy, je možné odchýlku $\pm 2 \%$ zanedbať, a max. prípustná odchýlka je $\pm 5 \%$. Z výslednej odchýlky uvedenej v tabuľke č.1 vyplýva teda, že neuvažovanie korekčných činiteľov predpísaných normou STN IEC 60909 nemá až taký zásadný vplyv na vypočítanú hodnotu skratového prúdu.

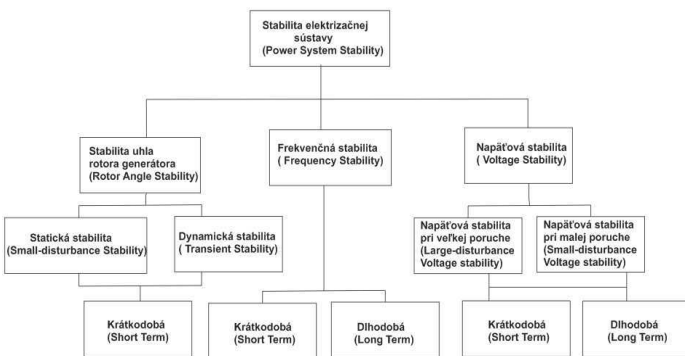
Okrem hodnoty súmerného rázového skratového prúdu, PSLF podáva na výsledkovej obrazovke aj informáciu o skratovej impedancii, amplitúdovú hodnotu skratového prúdu, hodnotu napätí v jednotlivých fázach a zložkách (spätnej, súslednej, netočivej)

a nakoniec aj informáciu o príspevku do miesta skratu od ostatných zdrojov v sieti.

IV. ELEKTROMECHANICKÉ PRECHODNÉ JAVY V PSLF

Pri vyšetrowaní elektromechanických prechodných javov nám ide v prvom rade o zistenie, či je sústava stabilná alebo nestabilná. Stabilita sústavy je schopnosť sústavy obnoviť pôvodný rovnovážny stav, alebo samostatne zaujať nový rovnovážny stav pri jednej, alebo viacerých zmenách prevádzkových parametrov [2].

O tom, že stabilita sústavy je veľmi rozsiahly problém, hovorí aj uvedené delenie stability podľa IEEE a CIGRE (obr. 5):



Obr. 5. Klasifikácia stability elektrizačnej sústavy podľa IEEE a CIGRE [8]

V tejto kapitole sa budeme venovať modelovaniu dynamickej stability v PSLF. Pri dynamickej stabilite dochádza ku skokovej zmene zaťaženia činného výkonu. Skúmaná sústava môže prejsť do nového rovnovážneho stavu cez elektromechanický jav, alebo v dôsledku kývania rotorov dôjde k výpadku generátorov zo synchronizmu.

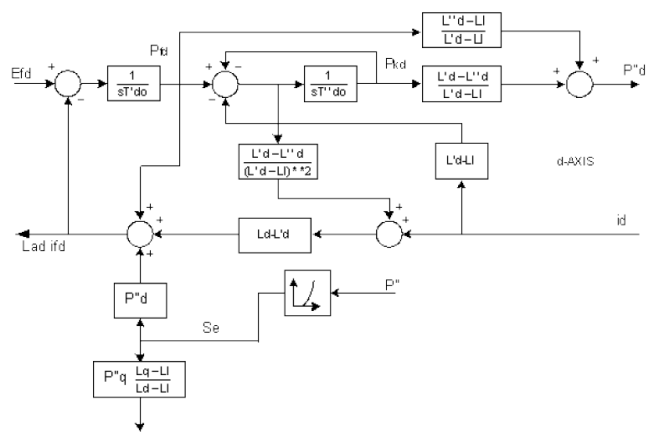
V dynamickom podsysteme PSLF je elektrizačná sústava popísaná algebrickými rovnicami elektrickej siete a diferenciálnymi rovnicami generátorov a zariadení pripojených k nim. Sieťový model je zavedený v podsysteme „load flow“. Skupina diferenciálnych rovníc dynamickej simulácie je daná knižnicou dynamických modelov. Knižnica dynamických modelov je súbor kódových modulov, z ktorého každý zahŕňa funkciu diferenciálnej rovnice popisujúcej časť zariadenia. Moduly sú pripojené k odpovedajúcej prípojnici a vetve siete, a parametre týchto modulov sú zadávané v príkazovom riadku a ukladané do súboru „názov.dyd“. Všetky dynamické simulácie využívajú knižnicu modelov na načítanie a ukládanie parametrov modelov na vykonanie výpočtov a zaslanie výsledných premenných na výstup z programu. Výstup z programu je daný výstupmi z jednotlivých modelov.

Uvažujme opäť sústavu podľa obr. 1. Pre výpočet stability sústavy je potrebné zadať nasledovné dynamické modely, napr. model generátora, model budenia, model stabilizátora, model turbíny. Vytvoriť teda dynamický model v PSLF je teda náročné z hľadiska vstupných údajov potrebných pre čo najpresnejší výpočet dynamickej stability. Je takisto potrebné vybrať vhodný dynamický model z celého radu dynamických modelov pre jednotlivé prvky sústavy. Pri dynamických modeloch generátorov sa rozlišuje napr. model pre

hydrogenerátor, model pre turbogenerátor, model pre generátor veterných elektrární, model generátora používaný pri paroplynových cykloch atď. V tomto prípade bol zvolený ako model generátora model „genrou“:

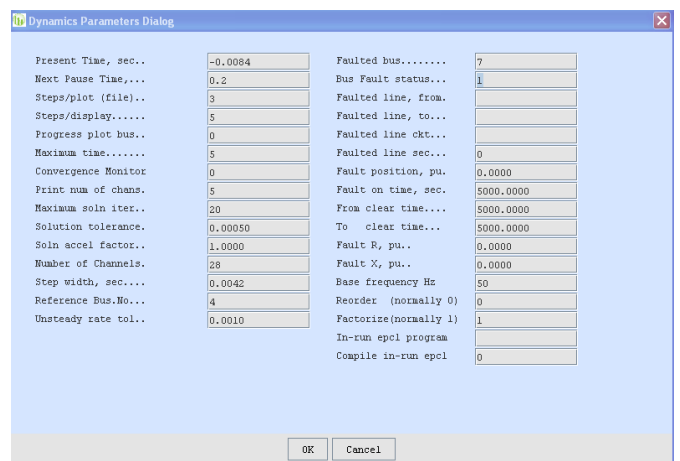
Vstupy: budiace napätie, výkon turbíny.

Výstupy: uhol rotora, napätie prípojnice, budiace napätie, elektrický výkon, uhlová rýchlosť hriadeľa, jalový výkon.



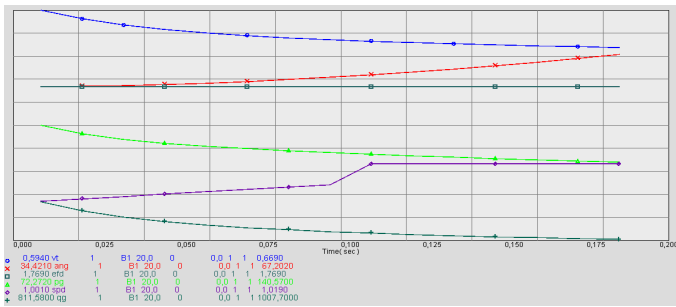
Obr. 6. Blokový diagram dynamického modelu generátora „genrou“

Ďalej uvažujme, že došlo k trojfázovému skratu na prípojnici č. 7. Na obr. 7 je možné vidieť počiatkové nastavenia pre výpočet stability. PSLF umožňuje zvoliť si za referenčnú prípojnicu buď prípojnicu, ku ktorej je pripojený jeden z generátorov, vtedy budú uvedené hodnoty záťažových uhlov u ostatných generátorov vzťahované k tomuto referenčnému generátoru, alebo zadať nulovú hodnotu do tejto ponuky, a v tom prípade budú hodnoty záťažových uhlov uvedené v celkovej hodnote[6].



Obr. 7. Počiatkové nastavenia pre výpočet stability

Na obr. 8 je uvedený grafický výstup pre generátor č. 1 v čase trvania poruchy 0.2 s, ako vzor výsledkovej obrazovky.



Obr. 8. Výpis výsledkov pre generátor č.1

V grafickom výstupe je zobrazený priebeh (záťažového uhla, napätia, uhlovej rýchlosti, činného výkonu, prúd generátora a jalového výkonu)

V. ZÁVER

Vzhľadom k rastúcej spotrebe elektrickej energie a ekonomickej a časovej náročnosti výstavby nových vedení, sú súčasné siete prevádzkované stále viac na hraniciach ich možností, pričom práve tie sú medzou stability. Je preto potrebné robiť čo najpresnejšie analýzy elektrizačnej sústavy, či už za normálnych prevádzkových stavov alebo poruchových, aby bola zabezpečená spoľahlivosť dodávky elektrickej energie k dodávateľovi. Programový balík PSLF ponúka užívateľovi široké spektrum výpočtových a modelovacích funkcií určených na analýzu sietí.

POĎAKOVANIE

Táto práca vznikla za podpory Agentúry na podporu výskumu a vývoja v rámci projektu APVV-0385-07 a Vedeckej grantovej agentúry Ministerstva školstva Slovenskej republiky a Slovenskej akadémie vied v rámci projektu VEGA-1/0166/10 a SK-BG-0010-08.

LITERATÚRA

- [1] Trojánek, Z – Hájek, J – Kvasinca, P.: Přejchodné jevy v elektrizačních soustavách. Praha: 1. vydanie. Vydavatelstvo SNTL/ALFA 1987. 04-534-87
- [2] Venikov, V.A.: Perechodnyje elektromechaničeskije procesy v električeskich sistemach. Moskva Vysšaja škola 1978.
- [3] Mešter, M. – Výpočet skratových prúdov v trojfázových striedavých sústavách. ABB-elektro, s.r.o., 2005. ISBN 80-89057-10-1
- [4] STN IEC 60909-0: Skratové prúdy v trojfázových striedavých sústavách. Časť 0: Výpočet prúdov. Slovenský ústav technickej normalizácie, apríl 2003.
- [5] STN IEC 60909-1: Skratové prúdy v trojfázových striedavých sústavách. Časť 1: Súčinitele na výpočet skratových prúdov v trojfázových striedavých sústavách. Slovenský ústav technickej normalizácie, august 2000.
- [6] Software documentation PSLF 17.0_05. General electric 2009.
- [7] Kolcun, M. – Chladný, V. – Varga, L. – Beňa, L. – Ilenin, S. – Leščinský, P. – Mešter, M.: Analýza elektrizačnej sústavy, časť: Skraty a stabilita v ES. Košice 2005
- [8] Mešter, M. – Hvizdoš, M. – Rusnák, J. – Szathmáry, P. – Vargončík, M.: Stabilita elektrizačnej sústavy. Equilibria 2006. ISBN 80-969224-9-1
- [9] Daneshjo, N.: Implementácia nových prístupov v navrhovaní robotických výrobných systémov : Doktorandská dizertačná práca. Košice : TU-SjF, 2002. 120 s.
- [10] Varga, L. - Ilenin, S. - Leščinský, P.: Prenos a rozvod elektrickej energie. Košice : Mercury - Smékal, 2003. 172 s. ISBN 80-89061-85-0.

[11] Noháčová, L - Martinek, Z.: Development and current situation of renewable energy resources from the point of view of wind power energy in the EU. Komunalna energetika = Power engineering, 2008.

[12] Bracínik, P.: The optimization of signals transferred from 22 kV lines to dispatching control center by decision tree algorithm, X. International PhD Workshop OWD 2008, Wisla, Poland, 2008, 10, 18. - 21., AFC, str.: 167 - 170, ISBN 83-922242-4-8

ADRESY AUTOROV

Vladimír Krištof, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská republika, vladimir.kristof@tuke.sk

Stanislav Kušnir, Technická Univerzita Košice, elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská republika, stanislav.kusnir@tuke.sk

Daniel Hlubeň, Technická Univerzita Košice, elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská republika, daniel.hluben@tuke.sk

Michal Kolcun, Technická Univerzita Košice, elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská republika, michal.kolcun@tuke.sk