

Martin Kanálik, Anastázia Margitová

## Trojfázové skratové prúdy na svorkách synchronného generátora určené podľa normy STN EN 60909-0 a pomocou matematického modelu synchronného generátora

Synchronné stroje sú nevyhnutnou súčasťou elektrizačnej sústavy, plnia rad dôležitých úloh súvisiacich s výrobou elektrickej a mechanickej energie, premenou jednej formy energie na inú, riadením napätia, kompenzáciou účinníka a pod. Článok sa zaoberá výpočtom skratových pomerov po vzniku trojfázového symetrického skratu na svorkách turboalternátora. V prvej časti článku je znázornený postup matematického modelovania elektromagnetických vlastností synchronného stroja. Matematický opis synchronného stroja je sprevádzaný zavedením dq0 transformácie a systému pomerných jednotiek, čo vedie k vzniku komplexného analytického modelu: sústavy diferenciálnych rovníc prvého rádu s konštantnou pravou stranou. V ďalšej kapitole je riešený výpočet skratových prúdov v sieti so synchronnými generátormi určený podľa normy STN EN 60909-0:2016. V závere sú porovnané hodnoty nárazového skratového prúdu a ekvivalentného otepľovacieho skratového prúdu získané analytickým riešením pre rôznu veľkosť a účinník záťaže pripojenej na svorky synchronného generátora pred vznikom trojfázového skratu s hodnotami vypočítanými pomocou normy STN EN 60909-0:2016.

**Kľúčové slová:** turboalternátor; modelovanie synchronného stroja; dq0 transformácia; pomerné jednotky synchronného stroja; výpočet skratového prúdu

Synchronous machines are an essential part of the power system, they perform a number of important tasks related to the production of electrical and mechanical energy, energy conversion, voltage control, power factor compensation and so on. The article deals with the calculation of short-circuit conditions after a three-phase symmetrical short-circuit at the terminals of the round-rotor synchronous generator. The procedure of mathematical modeling of electromagnetic properties of the synchronous machine is shown in the first part of the paper. The mathematical description of the synchronous machine is related to the application of the direct-quadrature-zero transformation and the per unit system to create a complex analytical model: a system of the first order linear differential equations with the constant right side. The calculation of short-circuit currents in the network with synchronous generators determined according to the standard STN EN 60909-0:2016 is solved in the next chapter. The conclusion compares values of the peak short-circuit current and the equivalent thermal short-circuit current obtained from the analytical solution for the different size and power factor of load connected to the terminals of the synchronous generator before the three-phase short-circuit with the values calculated by the standard STN EN 60909-0:2016. **(Three-phase short-circuit currents at the terminals of a synchronous generator determined according to the standard STN EN 60909-0 and using the mathematical model of the synchronous generator)**

**Keywords:** round-rotor synchronous generator; modeling of a synchronous machine; direct-quadrature-zero transformation; per unit system of a synchronous machine; calculation of short-circuit current

### I. ÚVOD

Synchronné generátory predstavujú základný článok vo výrobe elektrickej energie v elektrizačnej sústave. Komerčné zrodzenie synchronného generátora možno datovať na rok 1891, kedy sa uskutočnil prvý striedavý diaľkový prenos elektrickej energie z Lauffenu do Frankfurtu (Nemecko, dĺžka 175 km, vedenie 20 kV). Mnoho veľkých celkov (záťaží) je poháňaných práve synchronnými motormi. Synchronné kompenzátory sú využívané na kompenzáciu jalového výkonu a riadenie napätia. Tieto tri zariadenia pracujú na rovnakom princípe a skupinovo sú pomenované ako synchronné stroje [1].

Základným prevádzkovým stavom každej elektrizačnej sústavy (teda aj synchronného stroja) 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 (rovnovážneho stavu), v dôsledku čoho vzniká prechodný jav.

Prechodné javy v elektrizačnej sústave vznikajú vždy pri jej prechode z jedného ustáleného stavu do nového ustáleného prevádzkového stavu alebo počas prechodného javu, keď niektorý prevádzkový parameter zmení svoju hodnotu tak, že nedôjde k obnoveniu rovnovážneho stavu, ale dôjde k tzv. nestabilite sústavy (napr. strate synchronizmu jedného z paralelne pracujúcich generátorov). Na opis správania sa synchronného generátora v takýchto podmienkach je dôležité určiť jeho ustálený stav, ale taktiež charakterizovať jeho dynamický chod počas prechodných dejov [1], [2].

Jednou z najčastejších príčin vzniku elektromagnetických prechodných javov v elektrizačnej sústave sú skraty. Vznik skratového prúdu predstavuje zmenu normálneho stavu, ktorá má za následok odpovedajúcu zmenu napätia a prúdu. Prechod z normálneho stavu do ustáleného stavu neprebíha okamžite. Skrat predstavuje porušenie rovnováhy energií, ktoré sú akumulované v indukčnostiach a kapacitách obvodov a trvá určitý čas, kým sa táto rovnováha obnoví. Pri skrate sa celková impedancia siete znižuje

a narastá prúd, čo vedie k zníženiu napätia v miestach blízkych skratu. Ideálny (dokonalý) skrat je charakterizovaný nulovou (resp. zanedbateľne malou) impedanciou v mieste skratu. Skratový prúd vyvolaný dokonalým skratom je vždy väčší ako skratový prúd spôsobený nedokonalým skratom (vytvoreným cez impedanciu, ktorú nemožno zanedbať), ak sa uvažujú rovnaké podmienky vzniku skratu. Preto sa pre stanovenie najvyšších skratových prúdov uvažuje dokonalý skrat. Ak sú skratom postihnuté všetky tri fázy, hovorí sa o symetrickom skrate. Všetky ostatné skraty sa radia medzi nesymetrické [3], [4], [5].

Norma STN EN 60909-0:2016 definuje symetrické a nesymetrické skratové prúdy v trojfázových striedavých sústavách nízkeho napätia a v trojfázových striedavých sústavách vysokého, veľmi vysokého a zvlášť vysokého napätia pri menovitej frekvencii 50 Hz alebo 60 Hz. Norma STN EN 60909-0:2016 stanovuje základné, použiteľné a stručné postupy vedúce k daným výsledkom s prijateľnou presnosťou [6].

## II. MATEMATICKÝ MODEL SYNCHRÓNNEHO STROJA NA ÚČELY VÝPOČTU SKRATOVÝCH PRÚDOV

Modelovanie a analýza synchronných strojov bola vždy výzvou. Problém sa začal skúmať v dvadsiatych a tridsiatych rokoch minulého storočia a je dodnes predmetom rôznych štúdií. Jestvuje značné množstvo literatúry riešiacie problematiku synchronných strojov v oblasti elektroenergetiky. Výskum v oblasti synchronných strojov je zvyčajne založený na intuícii, skúsenostiach a rokoch praxe. Publikácie jednotlivých autorov sa odlišujú zaužívaným označením, vzťahmi a spôsobom výpočtu, ktoré vedú k mierne odlišným výsledkom [7]-[12]. Existuje taktiež mnoho softvérov na analýzu, plánovanie, optimalizáciu a simuláciu normálnych a poruchových ustálených stavov a prechodných dejov s už naprogramovanými elementmi a užívateľským rozhraním, ktoré umožňujú modelovať synchronne stroje a ďalšie prvky tvoriace elektrizačnú sústavu [13], [14].

Synchronný stroj je definovaný ako striedavý točivý elektrický stroj, pri ktorom je efektívna hodnota indukovaného napätia priamo úmerná počtu otáčok magnetického poľa. Synchronný stroj pozostáva z dvoch základných častí: rotora a statora. V synchronnom stroji sú otáčky otáčavého magnetického poľa statora synchronne (zhodné) s otáčkami rotora.

Ak pracuje synchronný stroj ako generátor (alternátor), pohonný stroj (turbína) otáča rotorom, na ktorom je umiestnené budiace vinutie. Budiace vinutím preteká jednosmerný prúd produkujúci točivé magnetické pole, ktoré indukuje trojfázové napätie vo vinutí statora (kotvy). Ak sa generátor zaťaží, začne jeho trojfázovým statorovým vinutím pretekať prúd, čím sa vytvorí druhé otáčavé magnetické pole. Statorové vinutie (magnetický tok vyvolaný prúdom pretekajúcim statorovým vinutím) spätne pôsobí proti hlavnému magnetickému toku (vyvolanému budiacim prúdom a otáčaním rotora pohonným zariadením). Tento jav sa nazýva reakcia kotvy (statora), ktorá je potláčaná vinutiami amortizérov (tlmičov) umiestnenými na rotore [7], [15], [17]. Pri zaťažení alternátora sa otáčky rotora nezmenia, iba dochádza k fázovému posunu medzi osou statorového točivého magnetického poľa (tok) a osou rotorového magnetického poľa (statorové magnetické pole zaostáva za rotorovým v dôsledku reakcie kotvy). Tento fázový posun je definovaný vnútorným (záťažovým) uhlom  $\delta$ , vyjadreným v stupňoch ( $^\circ$ ) alebo radiánoch

(rad). Inak povedané, záťažový uhol  $\delta$ , vyjadruje fázový posun medzi vnútorným indukovaným napätím (naprázdno) na statore (od rotorového magnetického poľa) a svorkovým napätím synchronného generátora (od magnetického poľa vyvolaného statorovým prúdom).

Z hľadiska konštrukcie rotora a závislosti od rýchlosti jeho otáčok sa rozlišujú dva typy synchronných generátorov: s vyjadrenými pólmi alebo s hladkým rotorom. Vodné turbíny pracujú pri nižších rýchlostiach, využívajú sa pre pohon strojov s viacerými vyjadrenými pólmi. Tieto synchronne generátory sa nazývajú hydroalternátory. Parné turbíny umožňujú pohon synchronných strojov s vyšším počtom otáčok za jednotku času. Ide o stroje s hladkým rotorom, ktoré sú označované ako turboalternátory [12], [16]. Synchronna rýchlosť (otáčky za jednotku času) je definovaná ako [1], [16]:

$$n_s = \frac{f}{p} \quad (\text{ot/s}), \text{ resp. } (\text{s}^{-1}), \quad (1)$$

$$n_s = \frac{60f}{p} \quad (\text{ot/min}), \text{ resp. } (\text{min}^{-1}), \quad (2)$$

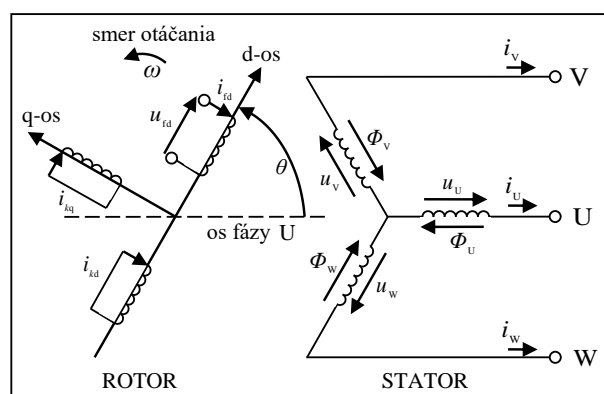
kde

$f$  je frekvencia (Hz),

$p$  je počet pólových dvojíc (párov) na rotore (-).

Odvodenie matematického modelu (rovníc) synchronného generátora vychádza z jeho konštrukcie. Na Obr. 1. sú znázornené náhradné elektrické obvody rotora a statora synchronného generátora, kde

$U, V, W$  je index pre veličiny statora (vzťahnuté na fázy  $U, V, W$ ),  
 $fd$  je index pre veličiny budiaceho vinutia,  
 $k$  je index pre počet vinutí amortizérov (1 až 2),  
 $kd$  je index pre veličiny vinutí amortizérov v d-osi,  
 $kq$  je index pre veličiny vinutí amortizérov v q-osi,  
 $\theta$  je uhol medzi d-osou a osou fázy  $U$  (rad) alebo ( $^\circ$ ),  
 $\omega$  je uhlová rýchlosť ( $\text{s}^{-1}$ ) [1], [18], [19].



Obr. 1. Elektrické obvody rotora a statora synchronného generátora.

Podľa Obr. 1. sa uvažuje (ak pracuje synchronný stroj ako generátor), že prúd tečúci vinutiami statora vystupuje zo stroja. Čo sa týka budiaceho prúdu a prúdov tečúcich v amortizéroch, berie sa do úvahy kladná polarita smerom do stroja. Na Obr. 1. sú vinutia rotora umiestnené v dvoch osiach [1], [17]-[19]:

- v pozdĺžnej d-osi, magneticky situovanej do centra severného pólu
- a priečnej q-osi, osi kolmej na pozdĺžnu d-os.

Uhol  $\theta$  (na Obr. 1.) súvisí s polohou (otáčaním) rotora stroja vzhľadom na stator, teda s uhlovou rýchlosťou  $\omega$ . Platí [1], [17]:

$$\theta = \omega t + \theta_0 \quad (\text{rad}), \text{ resp. } (^\circ), \quad (3)$$

kde

$t$  je čas (s),

$\theta_0$  je hodnota uhla  $\theta$  v čase  $t = 0$  s.

Pri tvorbe základných rovníc opisujúcich elektromagnetické správanie sa synchronného generátora sa uvažuje s týmito predpokladmi [17], [18]:

- Vinutia statora sú konštrukčne rozložené sinusovo pozdĺž vzduchovej medzery a vyššie harmonické sú zanedbateľné.
- Tvar drážok statora minimálne ovplyvňuje indukčnosti rotora pri zmene jeho pozície (otáčani).
- Magnetická hysterézia je zanedbateľná.
- Vplyv magnetickej saturácie je zanedbateľný.

Podľa Obr. 1., pre okamžité hodnoty fázových napätí na svorkách generátora, platí [17]-[20]:

$$u_u = \frac{d\Phi_u}{dt} - R_a i_u, \quad (4)$$

$$u_v = \frac{d\Phi_v}{dt} - R_a i_v, \quad (5)$$

$$u_w = \frac{d\Phi_w}{dt} - R_a i_w, \quad (6)$$

kde

$u_u$  je okamžitá hodnota fázového statorového napätia vo fáze U (V),

$u_v$  je okamžitá hodnota fázového statorového napätia vo fáze V (V),

$u_w$  je okamžitá hodnota fázového statorového napätia vo fáze W (V),

$\Phi_u$  je magnetický indukčný statorový tok vo fáze U (Wb),

$\Phi_v$  je magnetický indukčný statorový tok vo fáze V (Wb),

$\Phi_w$  je magnetický indukčný statorový tok vo fáze W (Wb),

$i_u$  je okamžitá hodnota statorového prúdu vo fáze U (A),

$i_v$  je okamžitá hodnota statorového prúdu vo fáze V (A),

$i_w$  je okamžitá hodnota statorového prúdu vo fáze W (A),

$R_a$  je rezistancia statorového vinutia vo fázach U, V, W ( $\Omega$ ).

Rovnice charakterizujúce elektromagnetické obvody rotora majú tvar [17]-[20]:

$$u_{fd} = \frac{d\Phi_{fd}}{dt} + R_{fd} i_{fd}, \quad (7)$$

$$u_{kd} = 0 = \frac{d\Phi_{kd}}{dt} + R_{kd} i_{kd}, \quad (8)$$

$$u_{kq} = 0 = \frac{d\Phi_{kq}}{dt} + R_{kq} i_{kq}. \quad (9)$$

kde

$u_{fd}$  je budiace napätie (V),

$u_{kd}$  je napätie vinutia  $k$ -teho amortizéra v d-osi (V),

$u_{kq}$  je napätie vinutia  $k$ -teho amortizéra v q-osi (V),

$\Phi_{fd}$  je magnetický indukčný rotorový tok v budiacom vinutí (Wb),

$\Phi_{kd}$  je magnetický indukčný rotorový tok  $k$ -teho amortizéra v d-osi (Wb),

$\Phi_{kq}$  je magnetický indukčný rotorový tok  $k$ -teho amortizéra v q-osi (Wb),

$i_{fd}$  je prúd tečúci budiacim vinutím (A),

$i_{kd}$  je prúd tečúci vinutím  $k$ -teho amortizéra v d-osi (A),

$i_{kq}$  je prúd tečúci vinutím  $k$ -teho amortizéra v q-osi (A),

$R_{fd}$  je rezistancia budiaceho vinutia ( $\Omega$ ),

$R_{kd}$  je rezistancia  $k$ -teho amortizéra v d-osi ( $\Omega$ ),

$R_{kq}$  je rezistancia  $k$ -teho amortizéra v q-osi ( $\Omega$ ).

Amortizéry, resp. tmiče (Obr. 1.), sú uzavreté (skratované) obvody, na ktoré nie je pripojený zdroj napätia (napätie je rovné nule). V tmičoch sa naindukujú prúdy iba v prípade, že dôjde k zmene magnetického toku (v statore alebo v budiacom vinutí): k vzniku prechodného deja [1], [17].

Magnetické indukčné toky  $\Phi_u$ ,  $\Phi_v$ ,  $\Phi_w$  v jednotlivých fázach statora synchronného generátora sú definované závislosťou od prúdov a indukčností všetkých vinutí alternátora (podľa vzťahu  $\Phi = li$ ,  $\Phi$  - magnetický indukčný tok,  $l$  - okamžitá hodnota indukčnosti,  $i$  - okamžitá hodnota prúdu). Keďže synchronný generátor je točivý stroj, niektoré jeho parametre nie sú statické, ale závisia od času (polohy rotora). Všetky vlastné a vzájomné indukčnosti statora a vzájomné indukčnosti medzi rotorom a statorom sú charakterizované funkciou pozície rotora voči statoru a menia sa v čase. Ak ide o vlastnú indukčnosť budiaceho vinutia a vinutí amortizérov v d-osi a q-osi a taktiež vzájomnú indukčnosť medzi týmito vinutiami, ich hodnoty sú konštantné (nemienia sa so zmenou pozície rotora v čase) [17], [18].

Keďže rovnice (4) až (6) pre fázové veličiny obsahujú závislosti indukčností vinutí synchronného generátora v čase, riešenie týchto rovníc predstavuje zložitú a komplexnú úlohu pri skúmaní synchronných strojov a problémov v elektrizačnej sústave. Východiskom je dq0 transformácia statorových fázových veličín, ktorá značne zjednodušuje výpočet. Veličiny vzťahnuté na jednotlivé fázy statorového vinutia sa transformujú do roviny tvorenej osami d a q opísanými vyššie. Transformáciu fázových prúdov  $i_u$ ,  $i_v$ ,  $i_w$  (fázy U, V, W), do roviny dq0 je možné vyjadriť ako [17], [18]:

$$\begin{pmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 120^\circ) & \cos(\theta + 120^\circ) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 120^\circ) & -\sin(\theta + 120^\circ) \\ 0,5 & 0,5 & 0,5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{pmatrix} \quad (\text{A}), \quad (10)$$

a inverznú transformáciu vo forme

$$\begin{pmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 1 \\ \cos(\theta - 120^\circ) & -\sin(\theta - 120^\circ) & 1 \\ \cos(\theta + 120^\circ) & -\sin(\theta + 120^\circ) & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{pmatrix} \quad (\text{A}), \quad (11)$$

kde  $i_d$ ,  $i_q$ ,  $i_0$  sú statorové prúdy vyjadrené v dq0 rovine.

Transformáciu dq0 (10) je možné aplikovať taktiež na statorové magnetické toky a napätia, prípadne záťaž pripojenú na svorky generátora [1].

Transformácia dq0 je charakterizovaná vlastnosťami, ktoré vedú k zjednodušeniam oproti modelu synchronného generátora vo fázových hodnotách (U, V, W) [1], [17]:

- Konštantné hodnoty indukčností statora a vzájomných indukčností medzi rotorom a statorom.
- Vynechanie točivého operátora  $\theta$ , resp.  $\omega$ : vynechanie závislosti od času.
- Veličiny sú vyjadrené namiesto okamžitých hodnôt v časovej oblasti (sinusové a kosínusové závislosti od času) vo vektorovom tvare (oblasti, resp. roviny dq0).
- Vektorový tvar veličiny je tvorený d-časťou (reálna zložka) a q-časťou (imaginárna zložka), v špecifických prípadoch aj nulovou zložkou.

Po dq0 transformácii rovnice pre fázové statorové napätia nadobudnú tvar [17], [18]:

$$u_d = \frac{d\Phi_d}{dt} - \omega\Phi_q - R_a i_d, \quad (12)$$

$$u_q = \frac{d\Phi_q}{dt} + \omega\Phi_d - R_a i_q, \quad (13)$$

$$u_0 = \frac{d\Phi_0}{dt} - R_s i_0, \quad (14)$$

kde

- $u_d$  je d-zložka fázového statorového napätia v dq0 rovine (V),
- $u_q$  je q-zložka fázového statorového napätia v dq0 rovine (V),
- $u_0$  je nulová zložka fázového statorového napätia v dq0 rovine (V),
- $\Phi_d$  je d-zložka magnetického indukčného statorového toku v dq0 rovine (Wb),
- $\Phi_q$  je q-zložka magnetického indukčného statorového toku v dq0 rovine (Wb),
- $\Phi_0$  je nulová zložka magnetického indukčného statorového toku v dq0 rovine (Wb),
- $i_d$  je d-zložka statorového prúdu v dq0 rovine (A),
- $i_q$  je q-zložka statorového prúdu v dq0 rovine (A),
- $i_0$  je nulová zložka statorového prúdu v dq0 rovine (A).

Veličiny uvedené v rovniciach (4) až (14) môžu byť okrem uvedených skutočných jednotiek vyjadrené aj v pomerných jednotkách (p. j.). Pri analýze siete je zvykom pri výpočtoch využívať pomerné jednotky na zjednodušenie kalkulácií, uľahčenie vyhodnocovania a porozumenia výsledkov. V prípade synchronného stroja existuje niekoľko systémov pomerných jednotiek, najčastejšie sa používa systém pomerných jednotiek nazývaný „ $L_{sd}$  rovnocenný systém pomerných jednotiek“. V danom systéme pomerných jednotiek je zakomponovaný prevod medzi statorom a rotorom synchronného generátora, podobne ako je to v prípade transformátora. Pri použití pomerných jednotiek sa za základné (vzťažné) jednotky berú do úvahy menovité hodnoty statorových veličín. Pri práci so skutočnými hodnotami musia byť veličiny rotora prevedené na stranu statora. Vyjadrenie veličín v skutočných hodnotách a pomerných jednotkách nie je možné kombinovať [1].

Základný matematický model synchronného generátora v dq0 rovine pozostáva z rovníc (12), (13), (14) pre statorové napätia a rovností (7), (8), (9) pre napätia obvodov rotora. Model synchronného generátora je tvorený systémom lineárnych diferenciálnych rovníc prvého rádu s konštantnou pravou stranou vo všeobecnom tvare [1], [21]:

$$\left[ \frac{di}{dt} \right] = [A][i] + [B], \quad (15)$$

kde

[A] je matica s konštantnými koeficientmi (obsahuje parametre synchronného generátora, resp. záťaže pripojenej na svorky generátora v (H) a ( $\Omega$ )),

[B] je matica vstupných známych veličín s konštantnými koeficientmi, zahŕňa v sebe maticu parametrov synchronného generátora v (H) a maticu statorových napätí ( $u_d, u_q, u_0$ ) a rotorových napätí ( $u_{fd}, u_{kd}, u_{kq}$ ) vo (V),

[i] je matica výstupných neznámych veličín, je tvorená maticou statorových prúdov ( $i_d, i_q, i_0$ ) a rotorových prúdov ( $i_{fd}, i_{kd}, i_{kq}$ ) v (A),

$\left[ \frac{dt}{dt} \right]$  je matica derivovaných neznámych rotorových a statorových prúdov v (A) podľa času v (s).

Riešenie sústavy (15) bližšie rozobrané v [1] pozostáva z určenia počiatočných podmienok: neznámych (prúdy [i]) v čase  $t=0$ .

Počiatočné podmienky sa definujú z riešenia ustáleného stavu synchronného generátora: zjednodušenia sústavy (15). Počas ustáleného stavu sa v rovniciach (15) pre opis synchronného stroja nevyskytujú časové derivácie, keďže nedochádza k zmene parametrov v čase. Taktiež všetky prúdy amortizérov sú rovné 0. Ide o uzavreté obvody, v ktorých sa naindukujú prúdy len v prípade, že dôjde k prechodnému dej. Nulová zložka sa vynecháva a uhlová rýchlosť sa nemení (je rovná menovitej).

Po úpravách uvedených v [1] je možné zakomponovať do sústavy (15) externú záťaž pripojenú na svorky synchronného generátora. Cez externú záťaž sa dajú vyjadriť statorové napätia ( $u_d, u_q, u_0$ ), čím sa jediným vstupným údajom stáva budiace napätie ( $u_{fd}$ ). Hodnotu budiaceho napätia  $u_{fd}$  je možné získať z riešenia ustáleného stavu synchronného generátora, a to nasledujúcim postupom:

- Určenie maximálnej hodnoty fázového napätia na svorkách synchronného generátora ( $U_{max}$ ), maximálnej hodnoty statorového prúdu ( $I_{max}$ ) a uhla  $\varphi$  medzi nimi. Veličiny  $U_{max}$  a  $I_{max}$  musia byť v nasledujúcich vzťahoch uvedené v pomerných jednotkách (p. j.), uhol  $\varphi$  v (rad) alebo ( $^\circ$ ). Parametre  $U_{max}$ ,  $I_{max}$  a  $\varphi$  sú volené podľa toho, z akého počiatočného stavu synchronného generátora je potrebné vychádzať [1].
- Výpočet vnútorného (záťažového) uhla rotora  $\delta_i$  v (rad) alebo ( $^\circ$ ) [1]:

$$\delta_i = \tan^{-1} \left( \frac{X_{qs} I_{max} \cos \varphi - R_s I_{max} \sin \varphi}{U_{max} + R_s I_{max} \cos \varphi + X_{qs} I_{max} \sin \varphi} \right), \quad (16)$$

kde

$X_{qs}$  je saturovaná synchronná reaktancia synchronného generátora v q-osi v (p. j.),

$R_s$  je rezistancia statorového vinutia synchronného generátora v (p. j.).

- Určenie statorových napätí a prúdov v dq0 rovine v (p. j.) [1]:

$$u_d = U_{max} \sin \delta_i, \quad (17)$$

$$u_q = U_{max} \cos \delta_i, \quad (18)$$

$$i_d = I_{max} \sin(\delta_i + \varphi), \quad (19)$$

$$i_q = I_{\max} \cos(\delta_i + \varphi). \quad (20)$$

- Výpočet budiaceho prúdu  $i_{fd}$  a budiaceho napätia  $u_{fd}$  v (p. j.) [1]:

$$i_{fd} = \frac{u_q + R_s i_q + X_{ds} i_d}{X_{ds} - X_l}, \quad (21)$$

$$u_{fd} = R_{fd} i_{fd}, \quad (22)$$

kde  $X_l$  je rozptylová reaktancia synchronného generátora v (p. j.).

Pomocou vzťahu (22) je možné určiť budiace napätie  $u_{fd}$  vyjadrené v (p. j.) pre špecifický prevádzkový stav. Pri riešení chodu synchronného generátora, v skutočných jednotkách, je nutné aj budiace napätie  $u_{fd}$  previesť na skutočné jednotky. Využitím daného postupu (rovnice (16) až (22)) sa taktiež získajú počiatočné hodnoty neznámych (prúdov  $[i]$ ) nevyhnutné pri riešení sústavy (15).

Pri skúmaní skratových pomerov v sieti so synchronnými generátormi sa uvažuje s hodnotami nasýtených (saturovaných) indukčností, resp. indukčných reaktancií synchronného generátora. Ideálny trojfázový skrat na svorkách synchronného generátora je možné realizovať nastavením impedancie externej záťaže na hodnotu blízku 0. Maximálne hodnoty skratových prúdov sa získajú v okamihu, keď napätie v určitej fáze prechádza nulou (v danej fáze sa vytvorí maximálna jednosmerná zložka skratového prúdu). Pri určení časového okamihu, kedy dôjde k tomuto stavu (napätie prechádza nulou), je potrebné brať do úvahy fázový posun medzi vnútorným indukovaním napätím naprázdno a svorkovým napätím na generátore vyjadrený záťažovým uhlom  $\delta_i$ .

### III. VÝPOČET TROFÁZOVÉHO SKRATU NA SVORKÁCH SYNCHRÓNNEHO GENERÁTORA PODĽA NORMY STN EN 60909-0

Výpočet skratových prúdov podľa normy STN EN 60909-0 vychádza z niekoľkých zjednodušení, napríklad po dobu trvania skratového prúdu sa nemení typ skratu, nedochádza k žiadnej zmene v sústave, neuvažuje sa s odpormi elektrických oblúkov a pod. Metóda použitá na výpočty skratových prúdov je založená na zavedení ekvivalentného napäťového zdroja v mieste skratu, ktorý predstavuje jediné aktívne napätie v náhradnej schéme sústavy po vzniku skratu. Všetky prvky sústavy sú nahradené svojou skratovou impedanciou. Na zjednodušenie výpočtu hodnôt skratových prúdov sa využíva metóda súmerných zložiek [6].

Veličiny v pomerných jednotkách uvedené v tejto kapitole sú vzťahnuté na menovité parametre synchronného generátora (rovnako ako v kapitole III).

Pri výpočte trojfázového skratového prúdu je synchronný generátor charakterizovaný korigovanou súslednou skratovou impedanciou (čiarka nad označením veličiny vyjadruje komplexné číslo, resp. fázor) [6]:

$$\bar{Z}_{KG} = K_G \bar{Z}_G = K_G (R_G + jX_G''), \quad (23)$$

kde

$\bar{Z}_{KG}$  je korigovaná skratová impedancia synchronného generátora v ( $\Omega$ ), resp. (p. j.),

$\bar{Z}_G$  je rázová skratová impedancia synchronného generátora v súslednej sústave v ( $\Omega$ ), resp. (p. j.),

$K_G$  je impedančný korekčný súčiniteľ (-),

$R_G$  je skutočná alebo fiktívna rezistencia statorového vinutia synchronného generátora v ( $\Omega$ ), resp. (p. j.),

$X_G''$  je nasýtená (saturovaná) rázová reaktancia synchronného generátora v d-osi v ( $\Omega$ ), resp. (p. j.).

Na výpočet skratových prúdov podľa normy STN EN 60909-0 sa používa hodnota nasýtenej rázovej reaktancie synchronného generátora v d-osi  $X_G''$  [6].

Za rezistanciu statorového vinutia synchronného generátora  $R_G$  je možné dosadiť katalogovú hodnotu udanú výrobcom (vyššie označená ako  $R_s$ ) alebo hodnotu fiktívnej rezistancie  $R_{IG}$ . Rezistencia  $R_{IG}$  sa môže použiť na výpočet nárazového skratového prúdu, nesmie sa použiť pri výpočte aperiodickej (jednosmernej) zložky skratového prúdu. Hodnota  $R_s$  je zvyčajne oveľa menšia ako hodnota fiktívnej rezistancie  $R_{IG}$ , v takom prípade norma STN EN 60909-0 odporúča pre  $R_G$  použiť hodnoty od výrobcu ( $R_s$ ). Veľkosť fiktívnej rezistancie  $R_{IG}$  je daná [6]:

$$R_{IG} = K_f X_G'', \quad (24)$$

kde  $K_f$  je bezrozmerný činiteľ na výpočet fiktívnej rezistancie  $R_{IG}$  synchronného generátora, ktorý môže nadobúdať hodnoty:

- 0,05 pre generátory s menovitým napätím nad 1 kV a menovitým zdanlivým výkonom väčším alebo rovným ako 100 MVA,
- 0,07 pre generátory s menovitým napätím nad 1 kV a menovitým zdanlivým výkonom menším ako 100 MVA,
- 0,15 pre generátory s menovitým napätím menším alebo rovným ako 1 kV.

Pre impedančný korekčný súčiniteľ synchronného stroja platí [6]:

$$K_G = \frac{U_n}{U_{nG}} \frac{c_{\max}}{1 + X_G'' \sin \varphi_{nG}}, \quad (25)$$

kde

$U_n$  je menovité združené napätie sústavy vo (V), resp. (p. j.),

$U_{nG}$  je menovité združené napätie synchronného generátora vo (V), resp. (p. j.),

$c_{\max}$  je napäťový súčiniteľ (-),  $c_{\max} = 1,1$  na výpočet maximálnych skratových prúdov,

$X_G''$  je nasýtená (saturovaná) pomerná rázová reaktancia synchronného generátora v d-osi, musí byť vyjadrená v (p. j.),

$\varphi_{nG}$  je uhol medzi menovitým prúdom a fázovým napätím synchronného generátora v (rad), resp. ( $^\circ$ ).

Počiatočný súmerný rázový skratový prúd  $I_k''$  predstavuje efektívnu hodnotu striedavej súmernej zložky predpokladaného skratového prúdu v okamihu vzniku skratu (pri konštantnej impedancii). Pre počiatočný súmerný rázový skratový prúd v (A), resp. (p. j.) vyvolaný trojfázovým skratom na svorkách synchronného generátora platí [6]:

$$I_k'' = \frac{c_{\max} U_n}{\sqrt{3} Z_{KG}}, \quad (26)$$

kde  $Z_{KG}$  predstavuje absolútnu hodnotu korigovanej skratovej impedancie synchronného generátora v ( $\Omega$ ), resp. (p. j.).

Nárazový skratový prúd  $i_p$  je charakterizovaný maximálnou možnou okamžitou hodnotou predpokladaného skratového prúdu. Veľkosť nárazového skratového prúdu závisí od okamihu, v ktorom došlo k skratu. Výpočet trojfázového nárazového skratového prúdu sa aplikuje na fázový vodič a okamih, v ktorom vznikne najväčší možný skratový prúd. Pri výpočte  $i_p$  sa predpokladá, že skrat vznikne pri prechode napätia nulou a že nárazový skratový prúd  $i_p$  sa dosiahne približne v polovici prvého cyklu. Nárazový skratový prúd v (A), resp. (p. j.) vyvolaný trojfázovým skratom na svorkách synchronného generátora je možné definovať ako [6]:

$$i_p = \kappa \sqrt{2} I_k'' \quad (27)$$

kde  $\kappa$  je bezrozmerný súčiniteľ pre pomer činnej zložky rázovej skratovej impedancie  $R_G$  k imaginárnej zložke rázovej skratovej impedancie  $X_{ds}''$  synchronného generátora a určí sa zo vzťahu:

$$\begin{aligned} R/X &= R_G / X_{ds}'' \\ \kappa &= 1,02 + 0,98e^{-3R/X} \end{aligned} \quad (28)$$

Ustálený skratový prúd je vyjadrený efektívnou hodnotou skratového prúdu, ktorý zostáva po doznení prechodného deja. Pri výpočte maximálneho ustáleného skratového prúdu  $I_{kmax}$  v (A), resp. (p. j.) sa počíta s maximálnym buđením synchronného generátora [6]:

$$I_{kmax} = \lambda_{max} I_{nG} \quad (29)$$

kde

$I_{nG}$  je menovitý prúd synchronného generátora v (A), resp. (p. j.),  
 $\lambda_{max}$  je súčiniteľ na výpočet maximálneho ustáleného skratového prúdu (-).

Súčiniteľ  $\lambda_{max}$  je možné odčítať zo závislostí uvedených v [6] pre synchronne generátory s hladkým rotorom alebo s vyjadrenými pólmami. V prípade strojov s hladkým rotorom sa uvažuje s najvyšším možným budiacim napätím rovným 1,3-násobku menovitého budiaceho prúdu alebo 1,6-násobku menovitého budiaceho prúdu pri menovitom zaťažení a účinníku. Pre synchronne stroje s vyjadrenými pólmami charakteristiky pre  $\lambda_{max}$  vychádzajú z 1,6-násobku alebo 2-násobku menovitého budenia pri menovitých podmienkach. Výpočet kriviek  $\lambda_{max}$  je uvedený v norme TNI IEC/TR 60909-1:2000 [22]. Okrem budiaceho napätia závisí súčiniteľ  $\lambda_{max}$  aj od nasýtenej rázovej reaktancie  $X_{ds}''$  v d-osi a nasýtenej synchronnej reaktancie  $X_{ds}$  v d-osi synchronného generátora, počiatočného súmerného rázového skratového prúdu  $I_k''$ , menovitého prúdu synchronného generátora  $I_{nG}$  a uhla medzi menovitým prúdom a fázovým napätím synchronného generátora  $\varphi_{nG}$ .

Ekvivalentný otepľovací skratový prúd  $I_{th}$  je definovaný efektívnou hodnotou prúdu, ktorý má rovnaké tepelné účinky a rovnaký čas trvania ako skutočný skratový prúd, ktorý môže obsahovať jednosmernú zložku a mení sa s časom. Ekvivalentný otepľovací prúd v (A), resp. (p. j.) vyvolaný trojfázovým skratom na svorkách synchronného generátora je možné charakterizovať vzťahom [6]:

$$I_{th} = I_k'' \sqrt{m+n} \quad (30)$$

kde

$m$  je súčiniteľ pre časovo závislý tepelný účinok jednosmernej zložky skratového prúdu (-),  
 $n$  je súčiniteľ pre časovo závislý tepelný účinok striedavej zložky skratového prúdu (-).

Vzťahy a závislosti na určenie činiteľov  $m$  a  $n$  sú uvedené v [6]. Činitele  $m$  a  $n$  závisia od frekvencie  $f$ , doby trvania skratu  $T_k$ , súčiniteľa  $\kappa$ , počiatočného súmerného rázového skratového prúdu  $I_k''$  a maximálneho ustáleného skratového prúdu  $I_{kmax}$ .

Ekvivalentný otepľovací skratový prúd  $I_{th}$  je možné určiť tiež výpočtom Jouleovho integrálu, ktorý vyjadruje energiu vytváranú v odporovom prvku sústavy prechodom skratového prúdu [6]:

$$\begin{aligned} T &= T_k \\ I_{th} &= \sqrt{\frac{\int_0^{T_k} i_k^2 dt}{T}} \end{aligned} \quad (31)$$

kde

$i_k$  je okamžitá hodnota skratového prúdu v (A), resp. (p. j.),  
 $T_k$  je doba trvania skratového prúdu (s).

Výpočet ekvivalentného otepľovacieho skratového prúdu  $I_{th}$  z diskretných okamžitých hodnôt prúdu (určených simuláciou alebo meraním, napríklad v prípade matematického modelu synchronného generátora vo forme diferenciálnych rovníc) po dobu trvania skratu 1 sekunda je možné realizovať na základe vzťahu:

$$I_{th} = \sqrt{\frac{\Delta t}{T_k} \sum_{n=1}^N i_{kn}^2} \quad (32)$$

kde

$\Delta t$  je časový krok vzorkovania v (s),  
 $N$  je počet vzoriek po dobu trvania skratu (-),  
 $i_{kn}$  je okamžitá hodnota skratového prúdu  $n$ -tej vzorky v (A), resp. (p. j.).

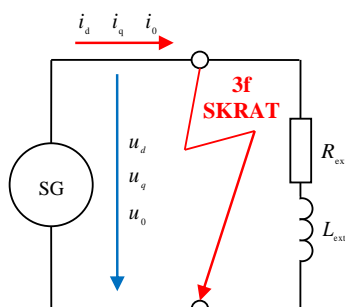
Jouleov integrál a ekvivalentný otepľovací skratový prúd  $I_{th}$  by mali byť vždy udané s dobou trvania skratu, s ktorým sú spojené [6].

#### IV. POROVNANIE VÝSLEDKOV VÝPOČTOV SKRATOVÝCH PRÚDOV

Na účely porovnania výsledkov výpočtov skratových prúdov pri vzniku ideálneho trojfázového skratu na svorkách synchronného generátora bol zvolený synchronný generátor s elektrickými parametrami uvedenými v TABULKE I [23]. Pri výpočte skratových prúdov, či už podľa normy STN EN 60909-0 (kapitola III), alebo pomocou vytvoreného matematického modelu synchronného generátora (kapitola II), bolo uvažované s menovitou frekvenciou siete 50 Hz. Vzhľadom na to, že v prípade uvažovaného generátora (ktorého elektrické parametre sú uvedené v TABULKE I) je menovitá frekvencia 60 Hz, boli všetky uvedené parametre uvažované aj pre frekvenciu 50 Hz.

Pri výpočte počiatočného súmerného rázového skratového prúdu ( $I_k''$ ), nárazového skratového prúdu ( $i_p$ ) a ekvivalentného otepľovacieho skratového prúdu ( $I_{th}$ ) podľa normy STN EN 60909-0 sa neuvažuje s vplyvom zaťaženia generátora pred vznikom skratu. Z tohto dôvodu bol okrem výpočtu  $i_p$  a  $I_{th}$  podľa normy STN EN 60909-0 realizovaný aj výpočet  $i_p$  a  $I_{th}$  pomocou matematického modelu generátora popísaného v kapitole II, a to pre rôznu veľkosť a účinník záťaže pred vznikom ideálneho trojfázového skratu na svorkách generátora. Pri všetkých výpočtoch bolo uvažované s konštantným budením synchronného stroja po celú dobu trvania skratu. Veľkosť budiaceho napätia bola vypočítaná podľa vzťahu (22) pre každý stav zaťaženia tak, aby efektívna hodnota napätia na svorkách generátora dosiahla 1,1-násobok menovitého združeného napätia  $U_{ng}$ . Pre výpočet ekvivalentného otepľovacieho prúdu bolo uvažované s dobou trvania trojfázového skratu 1 sekunda. Trojfázový skrat na svorkách generátora vznikol v okamihu, keď svorkové napätie generátora v jednej z fáz prechádzalo nulou.

Na Obr. 2. je zobrazená principiálna jednopólová schéma zapojenia záťaže na svorky synchronného generátora (SG) s vyznačením vzniku ideálneho trojfázového (3f) skratu na svorkách SG. V TABULKE II sú uvedené hodnoty maximálnych skratových prúdov pri vzniku ideálneho trojfázového skratu na svorkách synchronného generátora (podľa parametrov v TABULKE I). Skratové prúdy uvedené v TABULKE II sú vypočítané podľa normy STN EN 60909-0 v prípade uvažovania známej hodnoty odporu satorového vinutia  $R_s$ , resp. hodnoty fiktívnej rezistencie  $R_{ig}$  (bližšie opísané v kapitole III).



Obr. 2. Principiálna jednopólová schéma zapojenia externej záťaže na svorky synchronného generátora (SG) s vyznačením vzniku ideálneho trojfázového (3f) skratu na svorkách SG.

Analýza vplyvu veľkosti zaťaženia a účinníka záťaže na veľkosť skratových prúdov pri vzniku ideálneho trojfázového skratu na svorkách synchronného generátora bola realizovaná pomocou matematického modelu synchronného generátora popísaného v kapitole II (pri uvažovaní hodnôt nasýtených reaktancií) pre nasledovných päť rozličných stavov veľkosti zaťaženia pred vznikom skratu:

- synchronný generátor bez zaťaženia (naprázdno),
- synchronný generátor zaťažený na 25 % menovitého prúdu,
- synchronný generátor zaťažený na 50 % menovitého prúdu,
- synchronný generátor zaťažený na 100 % menovitého prúdu,
- synchronný generátor zaťažený na 110 % menovitého prúdu.

TABULKA I  
Parametre modelovaného generátora (turboalternátora)

Veľičina	Hodnota	Veľičina	Hodnota
$U_{ng}$ (kV) menovité napätie	13,8	$X'_{qs}$ (p. j.) saturovaná prechodná reaktancia v q-osi	0,434
$S_{ng}$ (MVA) menovitý zdanlivý výkon	112,1	$X'_q$ (p. j.) nesaturovaná prechodná reaktancia v q-osi	0,434
$I_{ng}$ (A) menovitý prúd	4690	$X''_{qs}$ (p. j.) saturovaná rázová reaktancia v q-osi	0,140
$\cos \varphi_{ng}$ (-) menovitý účinník	0,85	$X''_q$ (p. j.) nesaturovaná rázová reaktancia v q-osi	0,192
$X_{ds}$ (p. j.) saturovaná synchronná reaktancia v d-osi	1,949	$T'_{do}$ (s) prechodná časová konštanta naprázdno v d-osi	5,615
$X_d$ (p. j.) nesaturovaná synchronná reaktancia v d-osi	1,949	$T''_{do}$ (s) rázová časová konštanta naprázdno v d-osi	0,022
$X'_{ds}$ (p. j.) saturovaná prechodná reaktancia v d-osi	0,207	$T'_{qo}$ (s) prechodná časová konštanta naprázdno v q-osi	0,451
$X'_d$ (p. j.) nesaturovaná prechodná reaktancia v d-osi	0,278	$T''_{qo}$ (s) rázová časová konštanta naprázdno v q-osi	0,046
$X''_{ds}$ (p. j.) saturovaná rázová reaktancia v d-osi	0,164	$T'_d$ (s) prechodná časová konštanta nakrátko v d-osi	0,597
$X''_d$ (p. j.) nesaturovaná rázová reaktancia v d-osi	0,193	$T''_d$ (s) rázová časová konštanta nakrátko v d-osi	0,015
$X_l$ (p. j.) rozptylová reaktancia	0,164	$T'_q$ (s) prechodná časová konštanta nakrátko v q-osi	0,451
$X_{qs}$ (p. j.) saturovaná synchronná reaktancia v q-osi	1,858	$T''_q$ (s) rázová časová konštanta nakrátko v q-osi	0,015
$X_q$ (p. j.) nesaturovaná synchronná reaktancia v q-osi	1,858	$R_s$ ( $\Omega$ ) rezistencia satorového vinutia	0,0032

TABULKA II

Výsledky výpočtov maximálnych skratových prúdov pri vzniku ideálneho trojfázového skratu na svorkách uvažovaného synchronného generátora podľa STN EN 60909-0

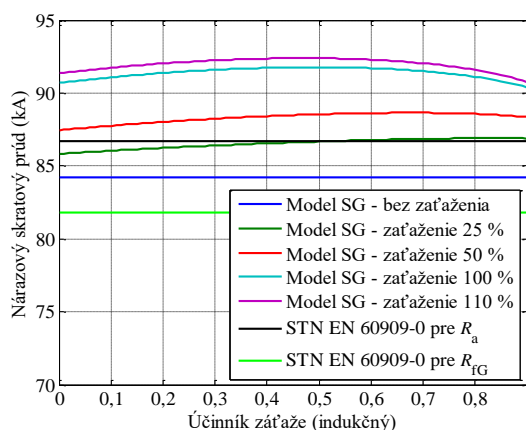
	Výpočet pomocou $R_s$	Výpočet pomocou $R_{ig}$
$I_k''$ (kA)	31,07	31,03
$i_p$ (kA)	86,74	81,77
$I_{th}$ (kA)	26,54	20,04

Na Obr. 3. sú uvedené priebehy nárazového skratového prúdu pri vzniku ideálneho trojfázového skratu na svorkách generátora v závislosti od veľkosti zaťaženia a veľkosti účinníka záťaže pred vznikom skratu. Tieto závislosti boli určené pomocou matematického modelu popísaného v kapitole II. Čierna čiara predstavuje hodnotu nárazového skratového prúdu vypočítanú pomocou normy STN EN 60909-0 pri uvažovaní rezistencie statora  $R_s$  (podľa TABULKY I) a svetlozelená čiara vyjadruje hodnotu nárazového skratového prúdu učenú pomocou normy STN EN 60909-0 pri uvažovaní fiktívnej rezistencie generátora  $R_{IG}$  (určenej podľa vzťahu (24)).

Na Obr. 3. je vidieť výraznú závislosť hodnoty nárazového skratového prúdu od veľkosti zaťaženia a okrem stavu bez zaťaženia je zrejmy aj vplyv účinníka zaťaženia pred skratom. V prípade stavu naprázdno pred skratom bola vypočítaná hodnota (využitím modelu alternátora) nárazového skratového prúdu 84,23 kA, čo je o 2,51 kA menej ako hodnota nárazového skratového prúdu vypočítaná podľa normy STN EN 60909-0 (pri použití odporu statora  $R_s$ ), ale o 2,46 kA viac ako hodnota nárazového skratového prúdu vypočítaná podľa normy STN EN 60909-0 pre hodnotu  $R_{IG}$ .

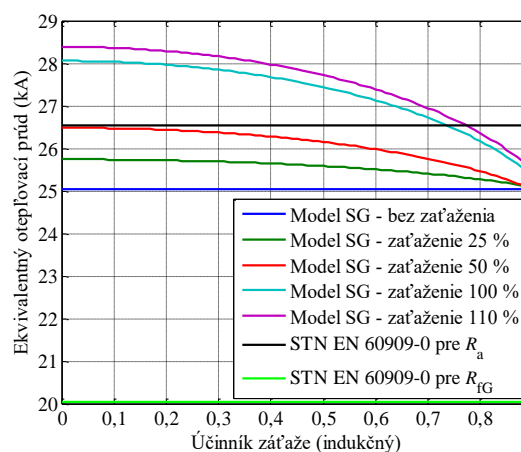
Najvyššia hodnota nárazového skratového prúdu pri 25 % zaťažení bola 86,90 kA a bola dosiahnutá pri účinníku 0,84. V prípade menšieho účinníka ako 0,56 boli hodnoty nárazového skratového prúdu pri 25 % zaťažení generátora pred skratom menšie ako hodnota nárazového skratového prúdu vypočítaná podľa normy STN EN 60909-0 pre hodnotu  $R_s$ . Hodnoty nárazového skratového prúdu boli pre každý účinník a veľkosť zaťaženia väčšie ako hodnota nárazového skratového prúdu vypočítaná podľa normy STN EN 60909-0 s využitím odporu statorového vinutia  $R_{IG}$ .

V prípade väčšieho zaťaženia generátora ako 25 % pred skratom boli pri akejkoľvek hodnote účinníka vypočítané väčšie hodnoty nárazového skratového prúdu oproti hodnote určenej normou STN EN 60909-0 pre  $R_s$ . Najväčšia hodnota nárazového skratového prúdu pri 50 % zaťažení bola 88,64 kA a bola dosiahnutá pri účinníku 0,70. Najväčšia hodnota nárazového skratového prúdu pri 100 % zaťažení bola 91,77 kA a bola získaná pri účinníku 0,49. Maximálna hodnota nárazového skratového prúdu pri 110 % zaťažení bola 92,39 kA pri účinníku 0,48.



Obr. 3. Priebeh nárazového skratového prúdu pri vzniku ideálneho trojfázového skratu na svorkách generátora, v závislosti od veľkosti zaťaženia a veľkosti účinníka záťaže pred vznikom skratu.

Na Obr. 4. sú uvedené priebehy ekvivalentného otepľovacieho prúdu po dobu skratu 1 sekunda pri vzniku ideálneho trojfázového skratu na svorkách generátora v závislosti od veľkosti zaťaženia a veľkosti účinníka záťaže pred vznikom skratu. Dané závislosti sú určené pomocou matematického modelu popísaného v kapitole II. Čierna čiara charakterizuje hodnotu ekvivalentného otepľovacieho prúdu vypočítanú pomocou normy STN EN 60909-0 pri uvažovaní rezistencie statora  $R_s$  a svetlozelená čiara vyjadruje hodnotu ekvivalentného otepľovacieho skratového prúdu vypočítanú pomocou normy STN EN 60909-0 pri uvažovaní fiktívnej rezistencie generátora  $R_{IG}$ .



Obr. 4. Priebeh ekvivalentného otepľovacieho skratového prúdu po dobu skratu 1 sekunda, pri vzniku ideálneho trojfázového skratu na svorkách generátora, v závislosti od veľkosti zaťaženia a veľkosti účinníka záťaže pred vznikom skratu.

Aj na Obr. 4. je zjavná výrazná závislosť hodnoty ekvivalentného otepľovacieho prúdu od veľkosti zaťaženia a okrem stavu naprázdno bez zaťaženia je viditeľný aj vplyv účinníka zaťaženia pred skratom. V prípade stavu bez zaťaženia pred skratom bola vypočítaná hodnota (podľa matematického modelu generátora) ekvivalentného otepľovacieho prúdu 25,03 kA, čo je o 1,51 kA menej ako hodnota ekvivalentného otepľovacieho prúdu vypočítaná podľa normy STN EN 60909-0 pre hodnotu  $R_s$ , ale o 4,99 kA viac ako hodnota ekvivalentného otepľovacieho prúdu vypočítaná podľa normy STN EN 60909-0 s použitím hodnoty  $R_{IG}$ .

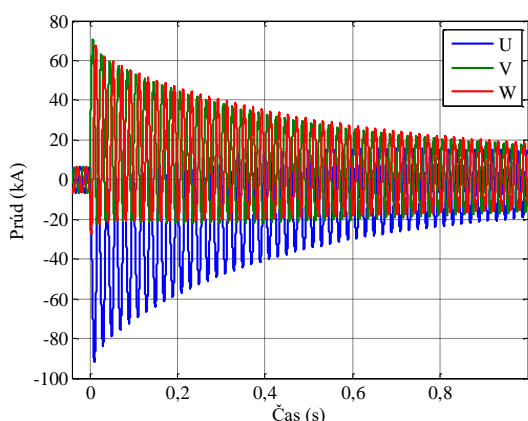
Najväčšie hodnoty ekvivalentného otepľovacieho prúdu boli dosiahnuté pri účinníku 0 (iba indukčná záťaž). Pri prúdovom zaťažení 50 % a menej boli vypočítané hodnoty ekvivalentného otepľovacieho prúdu menšie ako hodnota ekvivalentného otepľovacieho prúdu vypočítaná podľa normy STN EN 60909-0 pre hodnotu  $R_s$ . Všetky získané hodnoty ekvivalentného otepľovacieho skratového prúdu boli väčšie ako hodnota ekvivalentného otepľovacieho prúdu vypočítaná podľa normy STN EN 60909-0 pre hodnotu  $R_{IG}$ .

Najväčšia hodnota ekvivalentného otepľovacieho prúdu pri 100 % zaťažení bola 28,06 kA. Pri účinníku väčšom ako 0,73 bola hodnota ekvivalentného otepľovacieho prúdu vypočítaná pomocou matematického modelu popísaného v kapitole II menšia ako hodnota ekvivalentného otepľovacieho prúdu vypočítaná podľa normy STN EN 60909-0 pre hodnotu  $R_s$ . Hodnoty ekvivalentného otepľovacieho



prúdu pre všetky veľkosti a účinníky záťaže boli väčšie ako hodnota ekvivalentného otepľovacieho prúdu vypočítaná podľa normy STN EN 60909-0 pre hodnotu  $R_{sc}$ . Najväčšia hodnota ekvivalentného otepľovacieho prúdu pri 110 % zaťažení bola 28,38 kA, pričom pri účinníku väčšom ako 0,77 bola hodnota ekvivalentného otepľovacieho prúdu vypočítaná pomocou matematického modelu popísaného v kapitole II menšia ako hodnota ekvivalentného otepľovacieho prúdu vypočítaná podľa normy STN EN 60909-0 pre hodnotu  $R_s$ .

Na Obr. 5. je zobrazený príklad časového priebehu prúdov vo všetkých troch fázach pri vzniku ideálneho trojfázového skratu na svorkách synchronného generátora pri 100 % zaťažení s účinníkom 0,485 indukčných pred vznikom skratu vypočítaný pomocou matematického modelu popísaného v kapitole II.



Obr. 5. Časový priebeh prúdov vo všetkých troch fázach pri vzniku ideálneho trojfázového skratu na svorkách synchronného generátora pri 100 % zaťažení s účinníkom 0,485 indukčných.

## V. ZÁVER

Norma STN EN 60909-0 predstavuje základný dokument pre výpočet maximálnych (ako aj minimálnych) skratových prúdov v trojfázových sústavách. Výpočet maximálnych skratových prúdov je potrebné realizovať pre účely dimenzovania elektrických zariadení. Na účely dimenzovania elektrických zariadení z hľadiska ich mechanickej odolnosti voči silám pôsobiacim medzi vodičmi pri toku skratového prúdu je potrebné poznať hodnotu maximálneho nárazového skratového prúdu ( $i_p$ ). S cieľom dimenzovania elektrických zariadení z hľadiska ich tepelnej odolnosti pri toku skratového prúdu vodičmi je potrebné poznať hodnotu maximálneho ekvivalentného otepľovacieho prúdu ( $I_b$ ). Metodika výpočtu oboch týchto hodnôt uvedená v norme STN EN 60909-0 zanedbáva vplyv zaťaženia na vznik a priebeh skratových prúdov, a to aj v prípade, ak sa jedná o elektricky blízke skraty (elektricky blízke k synchronnému stroju).

Úlohou tohto článku bolo preveriť vplyv zaťaženia synchronného generátora pred vznikom ideálneho trojfázového skratu na jeho svorkách na priebeh skratových prúdov (na hodnoty maximálnych nárazových skratových prúdov a ekvivalentných otepľovacích skratových prúdov). Na tento účel bol vytvorený matematický model synchronného generátora v podobe sústavy diferenciálnych rovníc prvého rádu s konštantnou pravou stranou, ktorých riešenie je možné najst' analytickou metódou. Pomocou takto vytvoreného modelu bolo

možné realizovať sériu výpočtov priebehov skratových prúdov na svorkách generátora pri rôznych počiatočných podmienkach (rôzna veľkosť a účinník záťaže pred skratom).

Na základe výsledkov výpočtov prezentovaných v kapitole IV tohto článku, je možné tvrdiť, že veľkosť a účinník záťaže generátora pred vznikom skratu majú významný vplyv na veľkosť nárazového skratového prúdu, ako aj na veľkosť ekvivalentného otepľovacieho skratového prúdu. Pri uvažovaní zaťaženia generátora na úrovni 50 % a viac jeho menovitého prúdu a súčasne pri veľkosti efektívnej hodnoty napätia na svorkách generátora na úrovni 1,1-násobku menovitého združeného napätia  $U_{sc}$ , boli pomocou komplexného modelu generátora vypočítané vyššie hodnoty nárazového skratového prúdu oproti hodnote nárazového skratového prúdu vypočítanej podľa normy STN EN 60909-0 pre známu hodnotu  $R_s$ , a to o 0,71 kA v prípade zaťaženia na úrovni 50 % a účinníku 0 indukčných, resp. až o 5,03 kA v prípade zaťaženia na úrovni 100 % a účinníku 0,49 indukčných.

Podobná, hoci menej výrazná situácia nastala aj pri vyhodnocovaní vplyvu zaťaženia generátora pred skratom na veľkosť ekvivalentného otepľovacieho prúdu. Pri zaťažení na úrovni 100 % boli vypočítané hodnoty (pomocou analytického modelu generátora) ekvivalentného otepľovacieho prúdu väčšie ako hodnota ekvivalentného otepľovacieho prúdu vypočítaná podľa normy STN EN 60909-0 s využitím hodnoty  $R_s$  najviac o 1,52 kA, pričom väčšie hodnoty boli získané pri účinníku záťaže menšom ako 0,74 indukčných.

Výsledky výpočtov vplyvu zaťaženia, resp. stavu generátora v momente vzniku skratu poukázali na fakt, že metodika výpočtu hlavne maximálneho nárazového skratového prúdu podľa normy STN EN 60909-0, nie je dostatočne konzervatívna. Je možné nájsť stavy prevládajúce synchronného generátora, v prípade ktorých, ak by došlo k vzniku trojfázového skratu v najnepriaznivejších podmienkach, bola by skutočná hodnota nárazového skratového prúdu aj o 5,8 % vyššia ako hodnota vypočítaná podľa normy. Tento fakt je potrebné zohľadniť pri dimenzovaní elektrických zariadení elektricky blízke k synchronným generátorom, napríklad v rezerve na úrovni viac ako 6 % hodnoty nárazového skratového prúdu vypočítanej podľa normy STN EN 60909-0.

## POĎAKOVANIE

Túto prácu podporila Vedecká grantová agentúra Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky a Slovenskej akadémie vied grantom VEGA č. 1/0372/18.

## LITERATÚRA

- [1] A. Margitová, *Modelovanie prechodných javov synchronných strojov*. Technická univerzita v Košiciach, 2017, diplomová práca.
- [2] J. Džmura, *Úvod do stability prenosu elektrickej energie*. Technická univerzita v Košiciach, 2012.
- [3] M. Kolcun et al., *Analýza elektrizačnej sústavy*. Technická univerzita v Košiciach, 2005.
- [4] L. Reiss, *Teoretická elektroenergetika II*. Bratislava: Alfa, 1979.
- [5] M. Kanálik, "Vplyv parametrov synchronného generátora na dobu horenia oblúka pri vypínaní skratu," in *Elektroenergetika*, vol. 7, 2014, pp. 23-27.
- [6] STN EN 60909-0:2016, *Skratové prúdy v trojfázových sústavách striedavého prúdu. Časť 0: Výpočet prúdov*.

- [7] A. Blondel, "The Two-Reaction Method for Study of Oscillatory Phenomena in Coupled Alternators," in *Revue Générale de L'Electricité*, vol. 13, 1923.
- [8] R. E. Doherty and C. A. Nickle, "Synchronous Machines I and II," in *AIEE Trans.*, vol. 45, 1926, pp. 912-942.
- [9] R. H. Park, "Two-Reaction Theory of Synchronous Machines - Generalized Method of Analysis - Part I and Part II," in *AIEE Trans.*, vol. 48, 1929, pp. 716-727, vol. 52, 1933, pp. 352-355.
- [10] C. Concordia, *Synchronous Machines*. John Wiley & Sons, 1951.
- [11] E. W. Kimbark, *Power System Stability, Vol. III: Synchronous Machines*. John Wiley & Sons, 1956.
- [12] J. Machowski, J. W. Bialek, and J. R. Bumby, *Power System Dynamics: Stability and Control*. 2<sup>nd</sup> ed., John Wiley & Sons, 2008.
- [13] D. Medved', "Modeling of Power Systems Using of Matlab/SimPowerSystem," in *Elektroenergetika*, vol. 5, 2012, pp. 42-44.
- [14] J. Kozák and D. Medved', "Riešenie prechodných dejov a ich eliminácia využitím EMTP ATP," in *Electrical Engineering and Informatics IV*, 2013, pp. 418-423.
- [15] L. Cigánek, *Stavba elektrických strojov*. Praha: SNTL, 1958.
- [16] G. N. Petrov, *Elektrické stroje I*. Praha, 1980.
- [17] P. Kundur, *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill, 1994.
- [18] K. R. Padiyar, *Power System Dynamics: Stability and Control*. 2<sup>nd</sup> ed., BS Publications, 2008.
- [19] P. M. Anderson and A. A. Fouad, *Power System Control and Stability*. 1<sup>st</sup> ed., Iowa State University Press, 1977.
- [20] H. Saadat, *Power System Analysis*. McGraw-Hill, 1999.
- [21] A. Margitová, "Dynamic Modeling of a Synchronous Machine," in *SCYR 2018*, Košice: TU, pp. 83-87.
- [22] TNI IEC/TR 60909-1:2000 *Výpočet skratových prúdov v trojfázových striedavých sústavách. Časť 1: Súčinitele na výpočet skratových prúdov v trojfázových striedavých sústavách podľa IEC 60909*.
- [23] J. C. Das, *Power System Analysis: Short-Circuit Load Flow and Harmonics*. Marcel Dekker, 2002.

#### ADRESY AUTOROV

Martin Kanálik, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská republika, [Martin.Kanalik@tuke.sk](mailto:Martin.Kanalik@tuke.sk)

Anastázia Margitová, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská republika, [Anastazia.Margitova@tuke.sk](mailto:Anastazia.Margitova@tuke.sk)