

Martin Kanálik

Vplyv parametrov synchronného generátora na dobu horenia oblúka pri vypínaní skratu

Článok sa zaoberá problematikou vyšetrenia vplyvu parametrov synchronného generátora na dobu horenia oblúka pri vypínaní skratu výkonovým (generátorovým) vypínačom. Vplyv jednotlivých parametrov stroja je v tomto článku analyzovaný na matematickom modeli turboalternátora, v prípade ktorého bolo uvažované iba s pozdĺžnymi zložkami jednotlivých reaktancií. Cieľom článku je poukázať na problematiku vypínania skratových prúdov napájaných synchronnými generátormi pri vzniku elektricky blízkeho skratu. Vyšetrenie priebehu skratového prúdu napájaného zo synchronného generátora slúži najmä pre účely správneho návrhu generátorového vypínača, či správneho nastavenia oneskorenia pôsobenia ochrán na daný generátorový vypínač.

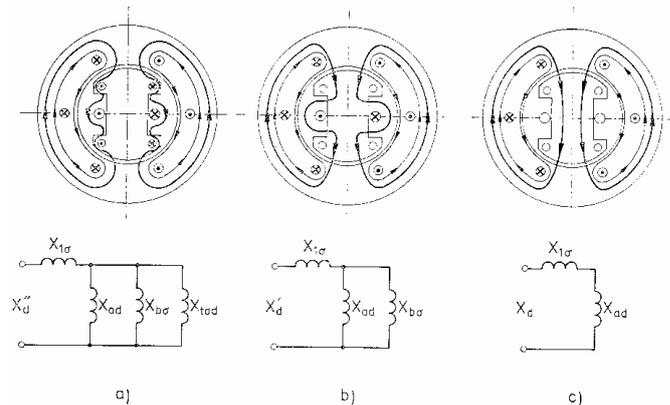
Kľúčové slová: výpočet skratového prúdu, synchronný generátor, parametre synchronného generátora, generátorový vypínač

I. ÚVOD

Vypínanie skratových prúdov od synchronných generátorov výkonovými vypínačmi v prípade vzniku elektricky blízkeho skratu patrí medzi technicky náročné úlohy. Problém spočíva vo vývine pomerne veľkých hodnôt jednosmernej zložky skratového prúdu a v postupne znižujúcej sa obálke striedavej zložky skratového prúdu generátora. To má za následok vysúvanie okamžitých hodnôt skratových prúdov nad, resp. pod časovú os, teda jav, kedy po dobu viac ako jedna perióda prúd neprechádza nulou. Vplyvom tohto javu horí v komore vypínača oblúk, ktorý zhasne až pri najbližšom prechode prúdu nulou. Tým sú extrémne namáhané najmä kontakty vypínača, ako aj elektrické zariadenia, cez ktoré tečú veľké skratové prúdy. V takýchto prípadoch sa na vypínanie skratových prúdov používajú špeciálne generátorové vypínače. Analýza a výpočet skratových prúdov v prípade elektricky blízkeho skratu synchronných generátorov je veľmi dobre rozpracovaná v [1] až [7]. V druhej kapitole tohto článku je v stručnosti uvedená teória výpočtu priebehov skratových prúdov, pričom cieľom týchto výpočtov je analyzovať dĺžku horenia oblúka v komore generátorového vypínača pre konkrétne parametre generátora. V tretej kapitole sú uvedené výsledky analýzy vplyvu jednotlivých parametrov daného generátora na dĺžku horenia oblúka v komore generátorového vypínača a teda na dobu vypnutia skratu.

II. MATEMATICKÝ MODEL SYNCHRÓNNEHO GENERÁTORA PRE ÚČELY VÝPOČTU PRIEBEHOV SKRATOVÝCH PRÚDOV

V prípade analýzy elektromagnetického prechodného deja pri vzniku trojfázového skratu na svorkách synchronného generátora sa celý dej rozdelí na tri časové úseky: rázový (trvajúci okolo), prechodný (trvajúci okolo) a nakoniec ustálený. Na obrázku 1 je zobrazená postupná zmena magnetického poľa a reaktancií statora pri trojfázovom skrate, pričom prípad a) reprezentuje rázový (subtranzitný) stav na počiatku vzniku skratu, kedy prúdy vyvolané poľom statora tečú tlmiacim aj budiacim vinutím, prípad b) reprezentuje prechodný (tranzitný) stav po odznení rázového prechodného javu, kedy prúd vyvolaný poľom statora tečie iba budiacim vinutím a prípad c) reprezentuje ustálený stav, pri chode nakrátko.



Obr. 1. Postupná zmena magnetického poľa a reaktancií statora pri trojfázovom skrate

kde

- X_d'' je rázová pozdĺžna reaktancia statora
- X_d' je prechodová pozdĺžna reaktancia statora
- X_d je pozdĺžna synchronná reaktancia statora
- $X_{1\sigma}$ je rozptylová reaktancia vinutí statora
- X_{ad} je pozdĺžna reaktancia kotvy
- $X_{b\sigma}$ je rozptylová reaktancia budiaceho vinutia prepočítaná na stator
- $X_{t\sigma d}$ je rozptylová reaktancia tlmiaceho vinutia v pozdĺžnej osi prepočítaná na stator

Pri uvažovaní veľkosti elektromotorického napätia na úrovni 1,1-násobku menovitého napätia generátora je možné vyjadriť v pomerných jednotkách efektívnu hodnotu rázovej zložky skratového prúdu i_k'' podľa vzťahu (1), efektívnu hodnotu prechodovej zložky skratového prúdu i_k' podľa vzťahu (2) a efektívnu hodnotu ustálenej zložky skratového prúdu i_k podľa vzťahu (3).

$$i_k'' = \frac{1,1}{\sqrt{3} \cdot X_d''} \quad (1)$$

$$i'_k = \frac{1,1}{\sqrt{3} \cdot x'_d} \quad (2)$$

$$i_k = \frac{1,1}{\sqrt{3} \cdot x_d} \quad (3)$$

kde

- x''_d je pozdĺžna rázová reaktancia statora vzťahnutá k menovitej impedancii generátora (p. j.)
- x'_d je pozdĺžna prechodová reaktancia statora vzťahnutá k menovitej impedancii generátora (p. j.)
- x_d je pozdĺžna synchronná reaktancia statora vzťahnutá k menovitej impedancii generátora (p. j.)

Časový priebeh prúdov tečúcich v jednotlivých fázach na svorkách generátora pri vzniku ideálneho trojfázového skratu na svorkách generátora je možné vyjadriť ako súčet striedavej zložky skratového prúdu (s postupne znižujúcou sa obálkou) a jednosmernej zložky skratového prúdu podľa vzťahu (2),

$$\begin{aligned} i_{k,L1}(t) &= i_{k,L1,s}(t) + i_{k,L1,DC}(t) \\ i_{k,L2}(t) &= i_{k,L2,s}(t) + i_{k,L2,DC}(t) \\ i_{k,L3}(t) &= i_{k,L3,s}(t) + i_{k,L3,DC}(t) \end{aligned} \quad (2)$$

kde $i_{k,m,s}(t)$ je priebeh striedavej zložky skratového prúdu vo fáze m a $i_{k,m,DC}(t)$ je priebeh jednosmernej zložky skratového prúdu vo fáze m , pričom:

$$\begin{aligned} i_{k,L1,s}(t) &= \sqrt{2} \cdot \left[(i''_k - i'_k) e^{-\frac{t}{T''_d}} + (i'_k - i_k) e^{-\frac{t}{T'_d}} + i_k \right] \cdot \sin(\omega \cdot t + \alpha - \varphi_k) \\ i_{k,L2,s}(t) &= \sqrt{2} \cdot \left[(i''_k - i'_k) e^{-\frac{t}{T''_d}} + (i'_k - i_k) e^{-\frac{t}{T'_d}} + i_k \right] \cdot \sin(\omega \cdot t + \alpha - \varphi_k - 120^\circ) \\ i_{k,L3,s}(t) &= \sqrt{2} \cdot \left[(i''_k - i'_k) e^{-\frac{t}{T''_d}} + (i'_k - i_k) e^{-\frac{t}{T'_d}} + i_k \right] \cdot \sin(\omega \cdot t + \alpha - \varphi_k + 120^\circ) \end{aligned} \quad (3)$$

a

$$\begin{aligned} i_{k,L1,DC}(t) &= \sqrt{2} \cdot i''_k \cdot \sin(\alpha - \varphi_k) e^{-\frac{t}{T''_d}} \\ i_{k,L2,DC}(t) &= \sqrt{2} \cdot i''_k \cdot \sin(\alpha - \varphi_k - 120^\circ) e^{-\frac{t}{T''_d}} \\ i_{k,L3,DC}(t) &= \sqrt{2} \cdot i''_k \cdot \sin(\alpha - \varphi_k + 120^\circ) e^{-\frac{t}{T''_d}} \end{aligned} \quad (4)$$

kde

- t je čas
- T''_d je rázová pozdĺžna časová konštanta generátora pri vzniku trojfázového skratu na jeho svorkách
- T'_d je prechodná pozdĺžna časová konštanta generátora pri vzniku trojfázového skratu na jeho svorkách
- T_a je časová konštanta jednosmernej zložky skratového prúdu statora (časová konštanta statorového vinutia pri otáčajúcom sa rotore spojenom nakrátko)
- α je uhol určujúci dobu vzniku skratu (uhol napätia v referenčnej fáze L1 v dobe vzniku skratu)
- ω je uhlová frekvencia
- φ_k je uhol medzi napätím a prúdom počas skratu

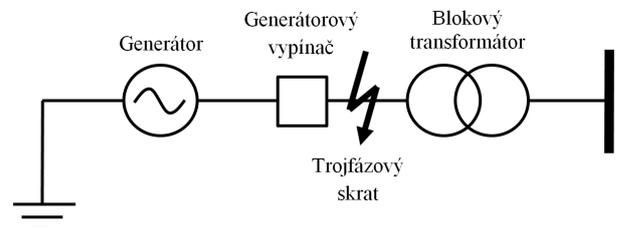
Pre zjednodušenie úvah ako aj z dôvodu dosiahnutia najhoršieho prípadu z pohľadu veľkosti a doby trvania vypínania skratového prúdu, bolo pri výpočtoch, ktorých výsledky sú uvedené v nasledujúcom texte uvažované s hodnotou uhla medzi napätím a prúdom počas skratu $\varphi_k = 90^\circ$, zanedbaním odporu a parametre generátora ako aj jeho otáčky boli uvažované ako konštantné bez ohľadu na dobu trvania a typ skratu.

V tabuľke 1 sú uvedené parametre uvažovaného turboalternátora, v rámci ktorého bude v nasledujúcej kapitole uvedený vplyv jednotlivých jeho parametrov na dobu vypínania skratu generátorovým vypínačom inštalovaným bezprostredne za generátorom (veľkosť impedancie medzi svorkami generátora a generátorovým vypínačom je v takom prípade možné zanedbať).

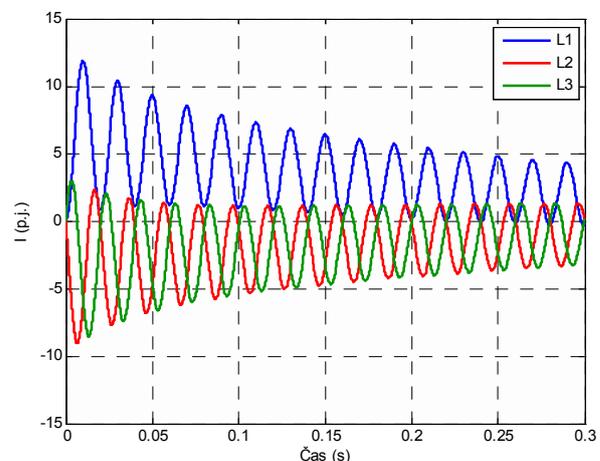
TABUĽKA I
Parametre analyzovaného synchronného generátora

Parameter	x''_d (p.j.)	x'_d (p.j.)	x_d (p.j.)	T''_d (s)	T'_d (s)	T_a (s)
Hodnota	0,14	0,24	1,80	0,035	0,500	0,250

Pri uvažovaní vzniku ideálneho trojfázového skratu tesne za generátorovým vypínačom podľa obrázka 2 je priebeh prúdov na svorkách generátora s parametrami podľa tabuľky I počas trojfázového kovového skratu, pre prípad vzniku skratu pri $\alpha = 0^\circ$ zobrazený na obrázku 3. V tomto prípade sa vo fáze L1 vyvinie maximálna hodnota jednosmernej zložky skratového prúdu, čo vedie k dosiahnutiu maximálnej hodnoty nárazového (špičkového) skratového prúdu. Veľkosť jednosmernej zložky skratového prúdu vo fáze L2 a L3 je rovnaká a má polovičnú hodnotu a opačný smer ako veľkosť jednosmernej zložky skratového prúdu vo fáze L1.

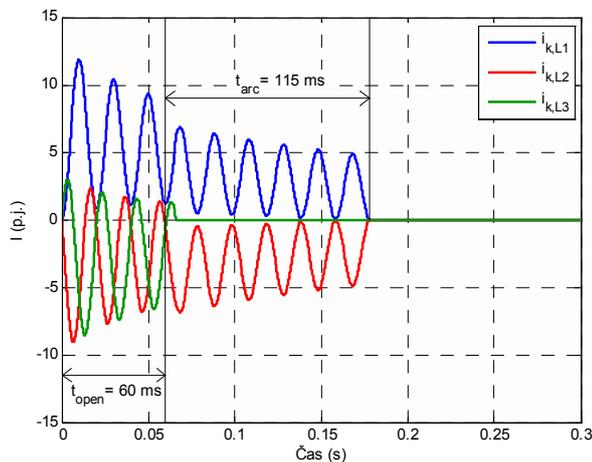


Obr. 2. Jednopolová schéma zapojenia synchronného generátora s vyznačením uvažovaného miesta vzniku ideálneho trojfázového skratu

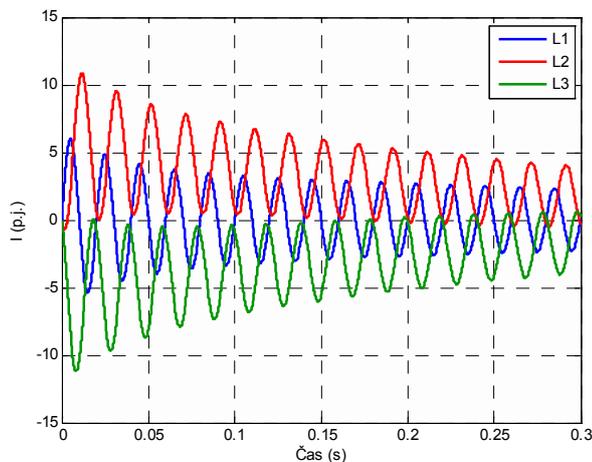


Obr. 3. Priebeh prúdov na svorkách generátora počas trojfázového kovového skratu, pre prípad vzniku skratu pri $\alpha = 0^\circ$

Na obrázku 4 je zobrazený priebeh skratového prúdu pre rovnaké podmienky ako v prípade skratu na obrázku 3, pri procese vypínania skratového prúdu generátorovým vypínačom. Začiatok vypínania (otvárania kontaktov) skratu bol uvažovaný v čase 60 ms. Minimálna doba horenia oblúka bola uvažovaná o veľkosti 3 ms. Ako vidieť z obrázka 4 po oddelení kontaktov generátorového vypínača došlo v tomto prípade takmer k okamžitému vypnutiu (prerušeniu toku) prúdu vo fáze L3. Toto vypnutie nastalo v najbližšom okamihu prechodu prúdu vo fáze L3 nulou. Po prerušení toku prúdu vo fáze L3 sa typ skratu zákonite mení na dvojfázový, čo spôsobilo vysunutie prúdu tečúceho vo fáze L2 pod časovú os. Nakoľko od tohto okamihu sú okamžité hodnoty prúdov vo fázach L1 a L2 rovnako veľké ale opačného smeru, dôjde k uhaseniu oblúka na zvyšných kontaktoch generátorového vypínača (a tým k vypnutiu príspevku skratového prúdu od generátora) až pri najbližšom prechode oboch prúdov vo fázach L1 a L2 nulou. Na obrázku 4 je celkový čas horenia oblúka, teda čas od začiatku otvárania kontaktov generátorového vypínača po prerušení toku prúdu vo všetkých troch fázach označený ako t_{arc} a v tomto prípade trval 115 ms. Celkový čas trvania skratu z pohľadu generátora bol v tomto prípade 175 ms.



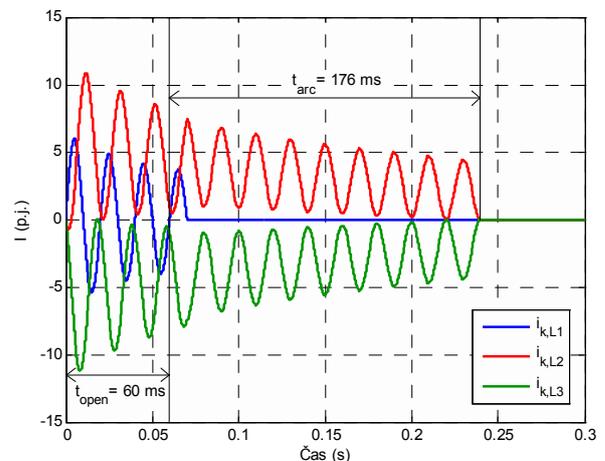
Obr. 4. Priebeh prúdov na svorkách generátora počas trojfázového kovového skratu vypínaného generátorovým vypínačom so začiatkom otvárania kontaktov vypínača v čase 60 ms, pre prípad vzniku skratu pri $\alpha = 0^\circ$



Obr. 5. Priebeh prúdov na svorkách generátora počas trojfázového kovového skratu, pre prípad vzniku skratu pri $\alpha = 90^\circ$

Pri uvažovaní vzniku ideálneho trojfázového skratu tesne za generátorovým vypínačom podľa obrázka 2, pre prípad vzniku skratu pri $\alpha = 90^\circ$, je priebeh prúdov na svorkách generátora s parametrami podľa tabuľky I zobrazený na obrázku 5. V tomto prípade sa vo fáze L1 nevyvinie jednosmerná zložka skratového prúdu. Veľkosti jednosmernej zložky skratového prúdu vo fáze L2 a L3 sú rovnaké avšak opačného smeru.

Na obrázku 6 je zobrazený priebeh skratového prúdu pre rovnaké podmienky ako v prípade skratu na obrázku 5 pri procese vypínania skratového prúdu generátorovým vypínačom. Začiatok vypínania (otvárania kontaktov) skratu bol uvažovaný (tak ako v predchádzajúcom prípade) v čase 60 ms. Minimálna doba horenia oblúka bola taktiež uvažovaná o veľkosti 3 ms. Ako vidieť z obrázka 6, v momente začiatku oddeľovania kontaktov generátorového vypínača prechádzal prúd vo fáze L1 nulou, ale keďže kontakty v tomto čase boli prakticky ešte spojené, k prerušeniu toku prúdu vo fáze L1 došlo až pri najbližšom prechode prúdu nulou. Po prerušení toku prúdu vo fáze L1 sa typ skratu mení na dvojfázový. Nakoľko od tohto okamihu sú okamžité hodnoty prúdov vo fázach L2 a L3 rovnako veľké ale opačného smeru, dôjde k uhaseniu oblúka na kontaktoch generátorového vypínača (a tým k vypnutiu príspevku skratového prúdu od generátora) až pri najbližšom prechode oboch prúdov vo fázach L2 a L3 nulou. Na obrázku 6 je zobrazený celkový čas horenia oblúka $t_{arc} = 176$ ms, čo je viac oproti predchádzajúcemu prípadu o 61 ms. Celkový trvania skratu z pohľadu generátora bol v tomto prípade 236 ms.

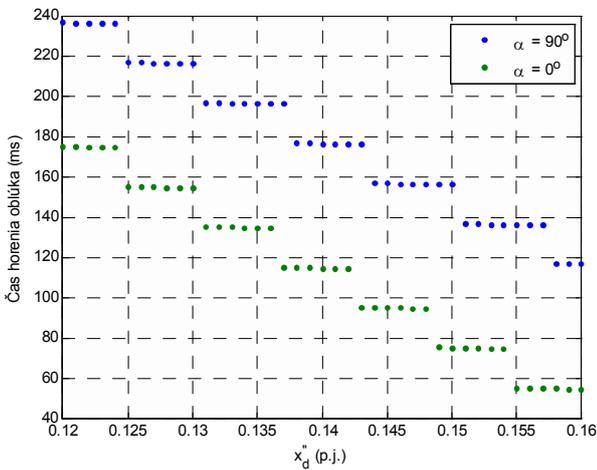


Obr. 6. Priebeh prúdov na svorkách generátora počas trojfázového kovového skratu vypínaného generátorovým vypínačom so začiatkom otvárania kontaktov vypínača v čase 60 ms, pre prípad vzniku skratu pri $\alpha = 90^\circ$

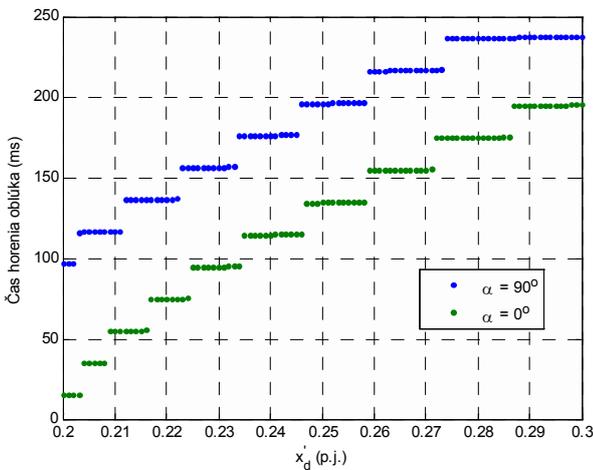
Vyššie uvedené dva prípady vyšetrenia priebehu skratových prúdov a doby horenia oblúka na kontaktoch generátorového vypínača počas vypínania skratu predstavujú dva extrémne prípady. V prípade vzniku skratu pri $\alpha = 0^\circ$ (teda v čase keď napätie vo fáze L1 prechádza nulou) dochádza k vývinu maximálnej hodnoty nárazového skratového prúdu prechádzajúceho generátorovým vypínačom a v prípade vzniku skratu pri $\alpha = 90^\circ$ (teda v čase keď napätie vo fáze L1 nadobúda svoje maximum) dochádza k najhorším podmienkam z pohľadu doby vypínania skratového prúdu. V tomto prípade horí oblúk na kontaktoch generátorového vypínača najdlhšie. Je potrebné zdôrazniť, že tieto extrémne prípady nastávajú pri $\alpha = 0^\circ$ resp. $\alpha = 90^\circ$ iba pri časoch začiatku vypínania rovných celočíselnému násobku doby jednej periódy, teda 0,02 s.

III. VPLYV PARAMETROV GENERÁTORA NA DOBU HORENIA OBLÚKA PRI VYPÍNANÍ SKRATU

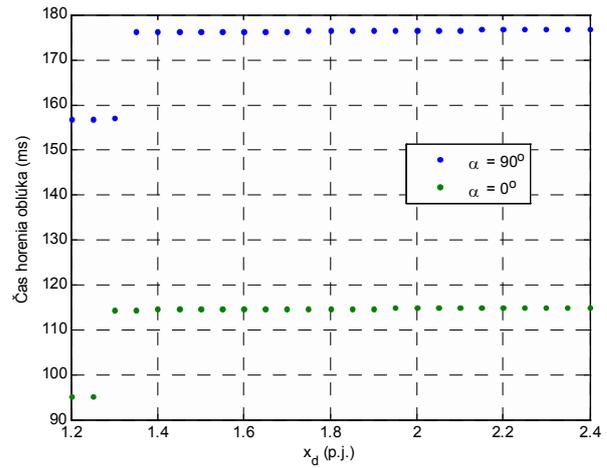
V predchádzajúcej kapitole, boli zobrazené priebehy skratových prúdov pri vzniku trojfázového skratového prúdu podľa obrázka 2 v prípade generátora s parametrami uvedenými v tabuľke I. Ako je zrejmé z obrázkov 4 a 6, na dobu horenia oblúka v komore generátorového vypínača má výrazný vplyv doba vzniku skratu a doba začiatku otvárania kontaktov vypínača. Na obrázkoch 7 až 12 sú zobrazené závislosti doby horenia oblúka v komore generátorového vypínača od hodnôt jednotlivých parametrov synchronného generátora. V prípade jednotlivých obrázkov sú uvedené závislosti od zmeny vždy iba jedného parametra x_d'' , x_d' , x_d , T_d'' , T_d' , resp. T_a , pričom ostatné parametre boli uvažované podľa tabuľky I. Prezentované výsledky boli získané na základe analýzy doby horenia oblúka pri vzniku trojfázového skratu a začiatku vypínania kontaktov generátorového vypínača v čase 60 ms od vzniku skratu. V rámci jednotlivých obrázkov sú uvedené závislosti pre vznik skratu pri $\alpha = 0^\circ$ resp. $\alpha = 90^\circ$.



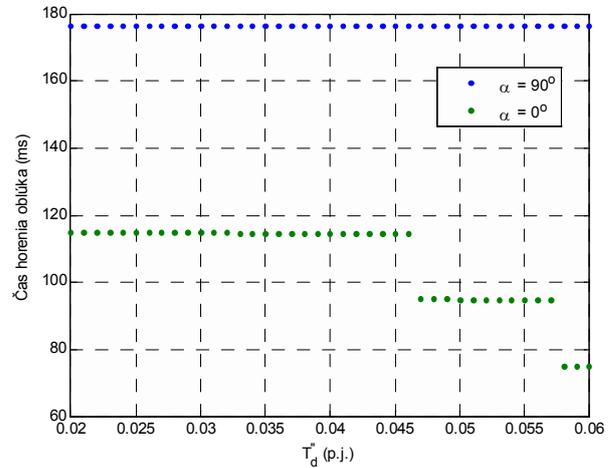
Obr. 7. Závislosť doby horenia oblúka počas vypínania trojfázového skratu od veľkosti rázovej reaktancie synchronného generátora pre rôznu dobu vzniku skratu



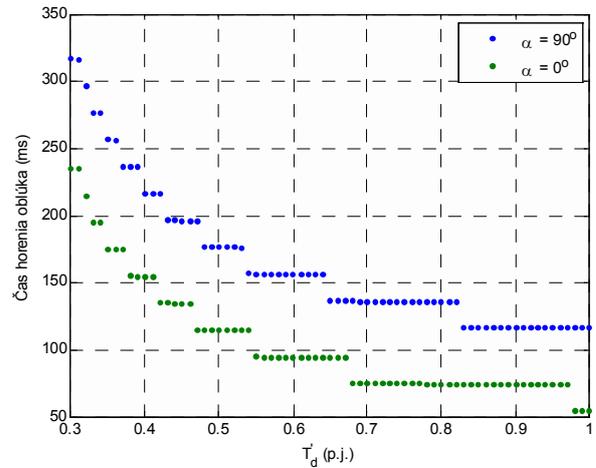
Obr. 8. Závislosť doby horenia oblúka počas vypínania trojfázového skratu od veľkosti prechodovej reaktancie synchronného generátora pre rôznu dobu vzniku skratu



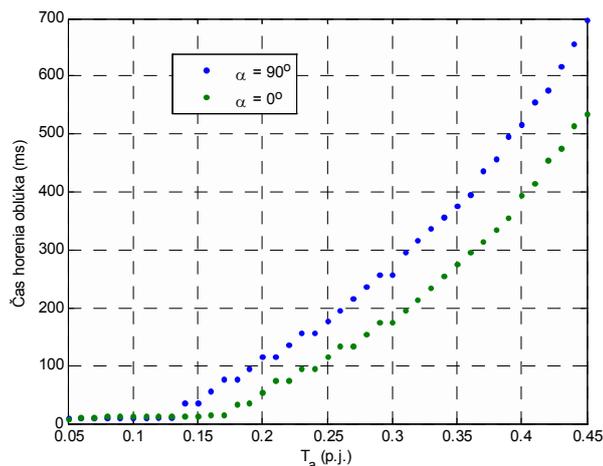
Obr. 9. Závislosť doby horenia oblúka počas vypínania trojfázového skratu od veľkosti ustálenej reaktancie synchronného generátora pre rôznu dobu vzniku skratu



Obr. 10. Závislosť doby horenia oblúka počas vypínania trojfázového skratu od veľkosti rázovej pozdĺžnej časovej konštanty synchronného generátora pre rôznu dobu vzniku skratu



Obr. 11. Závislosť doby horenia oblúka počas vypínania trojfázového skratu od veľkosti prechodovej časovej konštanty synchronného generátora pre rôznu dobu vzniku skratu



Obr. 12. Závislosť doby horenia oblúka počas vypínania trojfázového skratu od veľkosti časovej konštanty statorového vinutia synchronného generátora pre rôznu dobu vzniku skratu

Z vyššie uvedených závislostí je zrejmé, že najväčší vplyv na dobu horenia oblúka má konštanta statorového vinutia (jednosmerná časová konštanta) synchronného generátora T_a v rozsahu 0,2 až 0,45 s a naopak najmenší resp. v určitých prípadoch žiadny vplyv na dobu horenia oblúka majú synchronná reaktancia x_d a rázová časová konštanta T_d'' .

IV. ZÁVER

Článok sa v stručnosti zaoberá analýzou doby vypínania skratových prúdov, resp. doby horenia oblúka v komore generátorového vypínača počas vypínania skratových prúdov. Cieľom článku bolo poukázať na fakt, že pri návrhu generátorového vypínača, resp. pri výbere konkrétneho typu synchronného generátora je potrebné dbať na analýzu vypínania skratových prúdov pre tie najnepriaznivejšie podmienky. Vo všeobecnosti by doba horenia

oblúka v komore generátorového vypínača nemala presiahnuť 80 ms, preto je často potrebné nastaviť oneskorenie povelu ochrany na vypínač aby táto doba nebola presiahnutá. Takéto oneskorenie vypínania skratového prúdu chráni pred poškodením, resp. zničením samotný generátorový vypínač, na druhej strane však sa oneskorením vypínania skratového prúdu zvyšuje riziko poškodenia, či dokonca deštrukcie ostatných elektrických zariadení (napríklad blokových transformátorov).

POĎAKOVANIE

Túto prácu podporila Vedecká grantová agentúra Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky a Slovenskej akadémie vied grantom VEGA č. 1/0388/13.

LITERATÚRA

- [1] G. N. Petrov, "Elektrické stroje 2", *Academia Praha*, 1982, 21-055-82
- [2] L. Reiss, K. Malý, Z. Pavlíček, J. Bízík, "Teoretická elektrotechnika II", *ALFA Bratislava*, 1979, 302-05-23
- [3] Z. Trojánek, J. Hájek, P. Kvasnica, "Přechodné jevy v elektrizačních soustavách", *STNL Praha*, 1987, 04-534-87
- [4] J. C. Das, "Power System Analysis – Short-Circuit Load Flow and Harmonics", *Marcel Dekker, Inc*, New York, 2002, ISBN 0-8247-0737-0
- [5] M. Mešter, M. Hvizdoš, "Short-circuit calculation methodology for power-plant units according to STN 60909", *ELEN 2006*, - Praha : ČVUT, 2006, str. 1-4. - ISBN 8023976508
- [6] M. Kolcun, a kol., "Analýza elektrizačnej sústavy", *Technická univerzita Košice*, 2005, ISBN 80-89057-09-8,
- [7] IEEE C37.013-1997, "IEEE Standard for AC High-Voltage Generator Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis"

ADRESA AUTORA

Ing. Martin Kanálik, PhD., Technická Univerzita v Košiciach, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, 040 01 Košice, Slovenská Republika, Martin.Kanalik@tuke.sk