

Asymetrický zkratový proud

Václav Ježek

Katedra elektroenergetiky a ekologie, Západočeská univerzita v Plzni

Asymmetrical short circuit

Abstract

In this paper is described a short circuit current waveform, and more specifically, the fully-offset asymmetrical short circuit. This is the worst case short-circuit considered in the standards for metal-clad switchgear (ANSI/IEEE C37.20.2) and circuit breakers (ANSI/IEEE C37.04) as it imposes the highest mechanical forces on the conductors and their supports.

Keywords

Fully-offset asymmetrical short circuit, S-factor, %dc komponent, Generator circuit breaker

Úvod

Specifika vypínání generátorovými vypínači

Provoz generátorových vypínačů, umístěných mezi generátorem a blokovým transformátorem je spojen s extrémním zatížením díky vedení a vypínání velmi velkých proudů v běžném provozu (do 50kA) i během zkratů (do 200kA). Kromě toho jsou zatíženy prudkým nárůstem zotaveného napětí po vypnutí [3].

Generátorové vypínače jsou umístěny v elektrárnách mezi generátorem a blokovým transformátorem, obvykle jsou jednofázové, integrované do vodičů vedoucích od generátoru k transformátoru.

Přenos velkého výkonu a blízkost zdrojů energie z obou stran způsobuje výrazně obtížnější vypínání proudu než v běžné rozvodové síti. Běžně se u generátorů používaly tlakovzdušné vypínače, vzduch jako zhášecí medium ovšem vyžaduje relativně dlouhý čas pro obnovení izolační schopnosti. Proto bylo třeba omezit strmost vzestupu obnoveného napětí, což se běžně dělalo připojením paralelních rezistorů k vypínacím komorám. Nevýhoda tohoto postupu je nutnost použití druhé zhášecí komory pro přerušení proudu rezistorem. Nová generace specializovaných generátorových vypínačů využívajících SF₆ přišla v osmdesátých letech. Využití tepelné energie oblouku k pohonu chladícího plynu umožnilo zvýšení vypínací kapacity s nízkými provozními náklady. Vypínače tohoto typu se začaly nazývat „self-blast“. Redukce strmosti nárůstu zotaveného napětí pomocí paralelně připojených kondenzátorů byla dostatečná pro úspěšné vypnutí.

Vypínání zkratových proudů generátoru

Zkratové proudy u velkých generátorů mohou dosáhnout až 200kA. Po přerušení tohoto obvodu následují oscilace napětí na obou stranách vypínače, obnovené napětí je tak součtem dvou napětí. Na straně generátoru má nižší strmost, protože vlastní kapacita a impedance generátoru je obvykle vyšší než u transformátoru, kde je strmost nárůstu obnoveného napětí větší [3].

Zkrat na straně transformátoru (system-source faults)

V tomto případě je zdrojem zkratového proudu blokový transformátor, který čerpá ze sítě. Při tomto zkratu se vyskytují nejvyšší proudy, protože impedance transformátoru je obvykle nižší než generátoru. Na rozdíl od běžných vysokonapěťových vypínačů je proto v tomto případě i nejprudší nárůst zotaveného napětí [3].

Zkrat na straně generátoru (generator-source faults)

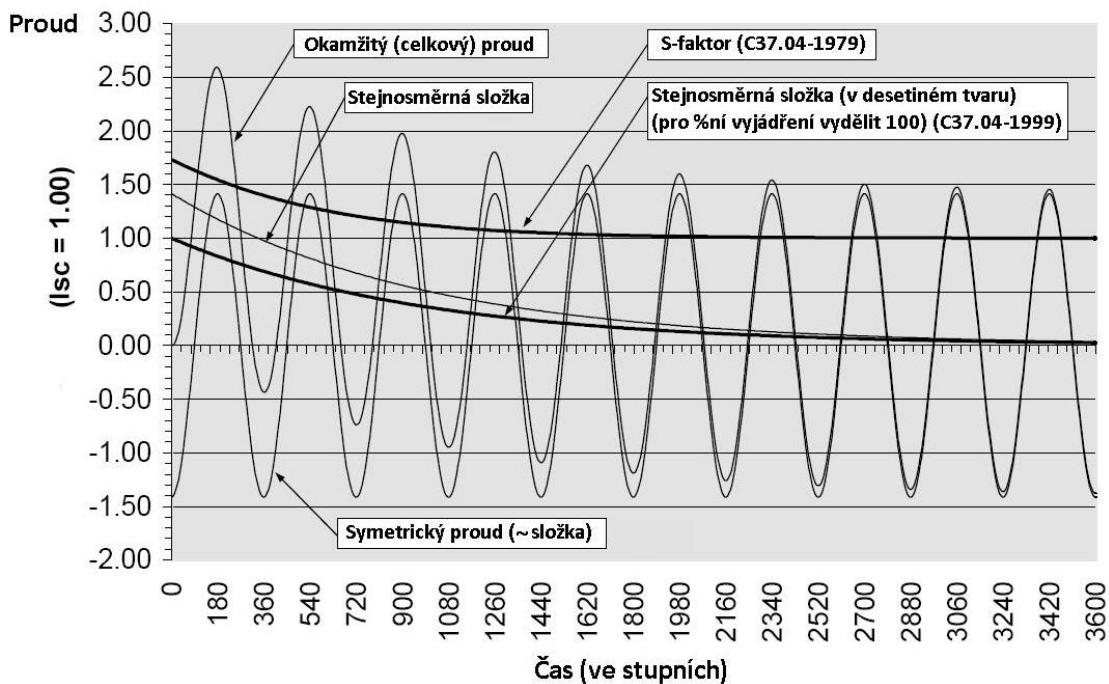
V tomto případě je zdrojem zkratového proudu generátor a zkrat může obsahovat velkou stejnosměrnou složku. Nicméně díky vypínacímu oblouku, který způsobil zkrat je strmost zotaveného napětí částečně snížena díky úbytkům napětí těchto oblouků, které mají charakter činného (tlumícího) odporu. Díky tomu stejnosměrná složka zkratového proudu rychleji odezní. Také relativně velká vnitřní kapacita generátoru tlumí strmost nárůstu zotaveného napětí přibližně na poloviční hodnotu než v předchozím případě [3].

Vypínání při chybném fázování (out-of-phase switching)

Charakteristiky průběhu zotaveného napětí při tomto vypínání jsou srovnatelné s vypínáním běžných provozních proudů. Pouze velikost zotaveného napětí je podstatně vyšší. Obtížnost vypnutí v tomto případě závisí na úhlu mezi napětími. Vzhledem k tomu, že úhel vyšší než 90° už může být nebezpečný pro generátor, je tato situace vyloučena zvláštní ochranou.

Asymetrický zkratový proud

Asymetrický zkratový proud je považován za nejnebezpečnější případ vypínání ve standardech pro zapouzdřené spínací zařízení ((ANSI/IEEE C37.20.2) a vypínače (ANSI/IEEE C37.04) z důvodu největšího mechanického namáhání vodičů a jejich podpěr, i vinutí generátorů [1].



Obr. 1 Průběh plně posunutého asymetrického zkratového proudu [1].

Průběh je odvozen od symetrického proudu efektivní hodnoty o velikosti 1.00 A braného jako základ pro přímé srovnání vůči k hodnotám daným ve standardech pro ostatní proměnné tedy vypínací a přídržný proud.

Ve výchozím stavu předpokládáme, že zkrat vzniká při nulové hodnotě proudu. V okamžiku zkratu proud vzrůstá z původní hodnoty na hodnotu zkratového ustáleného proudu. Tato hodnota je v obr. 1 označena jako symetrický proud, označovaná jako střídavá (~) složka zkratového proudu. V ideálním případě je odpor obvodu nulový a proud je omezen pouze induktancí obvodu. V takovém případě je zkratový proud a síťové napětí fázově posunuto o 90 stupňů. Tudíž nejhorším okamžikem pro vznik zkratového proudu nastává v okamžiku napěťové nuly. Ve skutečnosti není odpor obvodu roven nule, a tedy nejhorší stav nenastává v okamžiku napěťové nuly. Přesněji řečeno k němu dochází několik stupňů od napěťové nuly, avšak pro další popis budeme tuto přesnost opomíjet.

Zkratový proud je tedy omezen jen induktancí obvodu. Proud k induktoru se nemůže měnit skokově z počáteční hodnoty (nula) do hodnoty ustáleného stavu (v obrázku 1 -1,414 A, vrcholová hodnota symetrického proudu 1,00 A. Uvažujeme, že zkratový proud se skládá ze střídavé složky (symetrická složka) a stejnosměrné složky, která odpovídá rozdílu mezi ustáleným zkratovým proudem v okamžiku počátku zkratu a počáteční nulové hodnotě. V obrázku 1 se stejnosměrná složka musí rovnat velikosti okamžité hodnoty symetrického ustáleného proudu v okamžiku 0. Čili stejnosměrná složka v čase 0 musí mít hodnotu 1,414 A a je v protifázi k okamžité hodnotě symetrického zkratového proudu v čase 0.

Stejnosemřná složka zkratového proudu exponenciálně klesá z počáteční hodnoty s časovou konstantou, která je určena hodnotami induktance (X) a odporu (R) obvodu. V obou standardech IEC i ANSI/IEEE, je časová konstanta poklesu stejnosměrné složky normována na 45 ms, což odpovídá poměru X/R 15 pro 50 Hz systém. Stejnosemřná složka je vyjádřena jako procentní stejnosměrná složka a vypočtena z následujícího vztahu:

$$P = 100e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)} \quad (1)$$

$$\tau = (X/R)/2\pi f \quad (2)$$

Kde:

P	stejnosemřná složka vyjádřená v procentech
e	základ přirozených logaritmu, přibližně 2.71828 18284 59045
t	doba trvání v ms, po kterou je stejnosměrná složka předpokládána
τ	časová konstanta poklesu stejnosměrné složky v ms
X	induktance sítě k místu zkratu, v ohmech
R	odpor sítě k místu zkratu, v ohmech
F	síťová frekvence, v Hz

Skutečná stejnosměrná nejvyšší složka asymetrického zkratového proudu je zobrazena na obr. 1, činí 1,414 A v čase 0, klesá exponenciálně a blíží se k nule přibližně po deseti periodách (200 ms). Stejnosemřná složka v desetinném tvaru je též zakreslena a k převodu na procentní stejnosměrnou složku musí být vynásobena 100. Procentní stejnosměrná složka je také uváděna jako procentní asymetrie ve starších standardech. Celkový zkratový proud, v obrázku označený jako okamžitý (celkový) proud, je součtem symetrického proudu (střídavá složka) a stejnosměrné složky.

Stejnosemřná složka tvoří je obsažena v revizích (1999) hlavních standardů pro vypínače, zahrnující ANSI/IEEE C37.04, C37.06, C37.09 a C37.010. Ve verzích z roku 1979 byla stejnosměrná složka vypočítána pomocí S-faktoru, poměru asymetrického (celkového) proudu (vyjádřeného efektivní hodnotou) a symetrického efektivního proudu.

Koncepty S-faktoru a procentní stejnosměrné složky jsou matematicky ekvivalentní, přestože vyjadřují představu jiným způsobem. S-faktor v kterémkoli časovém okamžiku je též zobrazen na obrázku 1 pro možnost porovnání s moderním parametrem procentní složky.

S-faktor a procentní stejnosměrnou složku lze navzájem vztáhnou podle následujícího vztahu:

$$S = \frac{I_{\text{celkový}}}{I_{\text{symetrický}}} = \sqrt{1 + 2(\%n\acute{i} ss\ složka/100)} \quad (1)$$

Křivka S-faktoru nám umožňuje pozorovat asymetrický (celkový) proud. Pověšměme si, že S-faktor klesá z maximální hodnoty 1,707 v čase nula, dosahujíc 1,00 jen asi po 5 periodách. Protože jednotková hodnota S-faktoru je ekvivalentní symetrickému proudu, S-faktor indikuje změnu asymetrického proudu na symetrický během několika málo period.

Závěr

Problematikou vypínacího procesu generátorového vypínače se zabývám ve své doktorské práci. Analýza asymetrického zkratu je velmi důležitá, s ohledem na delší dobu hoření oblouku a tedy delší vypínací čas [4]. Kapitola pojednávající o vzniku a průběhu asymetrického zkratu je její součástí.

Tato práce vznikla za podpory Projektu IM 06059 Výzkumného centra MŠMT Praha

Literatura

- [1] Siemens TechTopics: Anatomy of a Short-Circuit, 2003
- [2] BAŠTA J., CHLÁDEK J., MAYER I.: Teorie elektrických strojů, SNTL 1968
- [3] SMEETS R.P.P, BARTS H.D., ZEHNDER L.: Extreme stresses on generator circuit breakers, A3-304 CIGRE 2006
- [4] JEŽEK V.: Analýza vypínacího procesu generátorového vypínače, ZČU 2008