Výpočty zkratů v technické praxi – členění textu

(Ing. Josef Vokál)

1 .Zkrat, zkratový proud, stanovení poměrů při zkratu
2 ..... Výpočty zkratových proudů
3 ..... Něco z historie norem pro výpočty zkratů
4 ..... Obrázky a teoretické základy k výpočtům zkratů
5 .. Výpočet zkratových proudů podle platných norem
6 ..... Literatura

Text přednášky ve formě článku bude zveřejněn na stránkách http://www.powerwiki.cz/wiki/vyuka

Co je to zkrat?

Platná norma [2] definuje zkrat jako

„náhodné nebo úmyslné vodivé spojení mezi dvěma nebo více vodivými částmi, vedoucí k tomu, že rozdíl elektrických potenciálů mezi těmito vodivými částmi je roven nule nebo má hodnotu blízkou nule“.

Můžeme se ovšem setkat i s jinak formulovanými definicemi nebo popisy tohoto jevu. Při zkratu protékají obvodem **zkratové proudy**, v blízkosti místa zkratu obvykle několikanásobně převyšující běžné provozní proudy, v síti dochází k poklesu napětí. V místě zkratu se často vyvine elektrický oblouk a zkrat se projevuje i dalšími efekty.

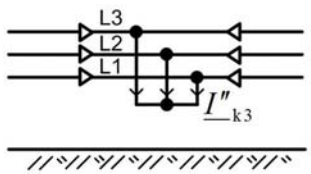
Zkratové proudy

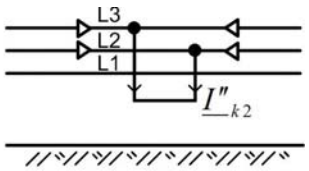
Hovoříme-li o **zkratových proudech**, pak musíme odlišit

- **celkový zkratový proud** tekoucí místem poruchy
- **zkratové příspěvky** přitékající **do zkratu po větvích** připojených do místa zkratu
- **dílčí zkratové proudy** protékající jednotlivými **větvemi schématu**
- **příspěvky jednotlivých zdrojů podílejících se na napájení zkratu**
- **zkratové proudy protékající zemí** a s ní spojenými vodivými prvky

Základní typy zkratů v trojfázové soustavě

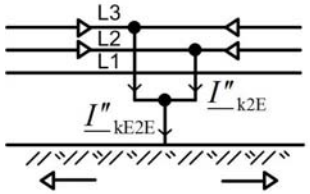
TROJFÁZOVÝ

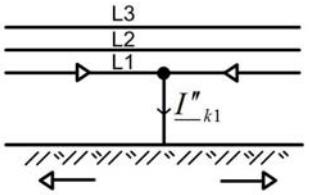




DVOUFÁZOVÝ

DVOUFÁZOVÝ ZEMNÍ





JEDNOFÁZOVÝ

Další druhy zkratů

Ze **základních typů zkratů** v trojfázových soustavách lze odvodit, případně k nim připojit, celou řadu dalších, složitějších poruch, které mají charakter zkratu. Vesměs se jedná o **změnu typu poruchy nebo jejího napájení během trvání** poruchy, tedy **o časový průběh poruchy**. Například jednoduchá porucha, která není včas eliminována, se změní na poruchu postihující více fází: jednofázový nebo dvoufázový zkrat přejde na dvoufázový zemní, dvoufázový nebo dvoufázový zemní zkrat může přejít na trojfázový zkrat. Kovový zkrat vzniklý dotykem vodičů může přejít ve zkrat obloukový. Působením elektrických ochran dojde během zkratu k přerušení napájecích cest a odpojení zdrojů zkratového proudu, ke kterému nemusí dojít ve stejném okamžiku - mění se tedy konfigurace sítě během trvání zkratu. Při neúspěšném působení automatiky opětného zapínání (OZ) se úmyslně krátkodobě přeruší napájení zkratu, k definitivnímu vypnutí napájecí cesty pak dochází až následně. Jako specifický případ jednofázového zkratu v trojfázovém rozvodu můžeme brát též zkrat na jednofázovém vývodu.

Rozdíl mezi zkratem a zemním spojením

V soustavách s neúčinně uzemněným uzlem, tedy v soustavách s uzlem izolovaným, uzemněným přes resonanční tlumivku nebo obecně přes velkou impedanci, nedochází při spojení jedné fáze na zem ke zkratu, ale **k zemnímu spojení**. K jednofázovému zkratu nebo dvojfázovému zemnímu zkratu tedy může dojít pouze v sítích pracujících s uzlem přímo uzemněným, nebo uzemněným přes malou impedanci, přesněji v sítích, kde činitel zemního spojení (earth fault factor) je menší než 1,4. (Činitel zemního spojení je pro dané místo a konfiguraci trojfázové soustavy dán poměrem největší efektivní hodnoty napětí zdravé fáze proti zemi při spojení jedné nebo více fází na zem v libovolném místě soustavy k efektivnímu napětí této fáze proti zemi v daném místě v soustavě bez spojení na zem, tedy před poruchou.)

Pokud dojde při provozu sítě se zemním spojením ke spojení další fáze se zemí, hovoříme o **dvojitém zemním spojení**, které se svým charakterem blíží dvojfázovému zkratu. (Výpočtem zkratových proudů při takovéto poruše vyvolané současným zemním spojením dvou fází v různých místech sítě a výpočtem zkratových proudů tekoucích zemí při jednofázovém zkratu se zabývá norma [6] .)

Odlišnosti anglické terminologie

V souvislosti s klasifikací poruch ve střídavých elektrických soustavách je snad vhodné upozornit na nebezpečí, které je skryto v odlišnostech anglické a české terminologie. Anglické **„line-to-line short circuit“** může označovat dvoufázový zkrat, ale také zkrat mezi dvěma vodiči jednofázového vývodu nebo hlavními vodiči jednofázové soustavy. Porucha „**line-to-earth foult**“ pak může být jednofázový zkrat, nebo jednofázové zemní spojení**. „Line-to-earth protection“** není zemní ochrana, ale ochrana působící při poruše „line-to-earth“, tedy při jednofázovém zkratu.

Zdroje zkratových proudů

Ve střídavých soustavách průmyslového kmitočtu se za **zdroje zkratových proudů** považují

- **synchronní stroje** (střídavé generátory, tj. turboalternátory a hydroalternátory, synchronní motory a synchronní kompenzátory)
- **asynchronní** (indukční) **stroje**
- **síťové napáječe**, zahrnující synchronní stroje elektricky vzdálené od místa zkratu
- **polovodičové systémy**, pokud mohou při zkratu dodávat zkratový proud

Střídavá a stejnosměrná složka zkratového proudu

Dojde-li ve střídavém elektrickém obvodu ke zkratu, vyvine se obvykle zkratový proud, který má mimo střídavé složky též složku stejnosměrnou. Velikost této aperiodické složky závisí na počáteční velikosti střídavého zkratového proudu, na proudu procházejícím obvodem před zkratem a především na okamžiku vzniku zkratu vzhledem ke střídavému průběhu napětí v místě zkratu. V jednoduchém obvodu stejnosměrná složka zaniká s časovou konstantou T_a, velikost této časové konstanty a tedy i rychlost zániku je dána poměrem R/X zkratového obvodu.

Zkrat elektricky vzdálený

Pokud je místo zkratu dostatečně elektricky vzdáleno od zdrojů zkratového proudu jakými jsou synchronní stroje, nebo pokud je podíl asynchronních motorů na počátečním zkratovém proudu zanedbatelný (do 5 %), potom velikost souměrné střídavé složky zkratového proudu (jeho efektivní hodnota) se s časem prakticky nemění, časový průběh se blíží průběhu zkratu s ideálním napěťovým zdrojem a hovoříme o **zkratu elektricky vzdáleném**.

Zkrat elektricky blízký

Jestliže příspěvek alespoň jednoho synchronního stroje k předpokládanému počátečnímu souměrnému rázovému zkratovému proudu I''_k překračuje dvojnásobek jmenovitého proudu stroje, nebo není-li příspěvek asynchronních motorů zanedbatelný, hovoříme o **elektricky blízkém zkratu.**

Zvláštní případy zkratů

Výpočty zkratů ve stejnosměrných obvodech vyžadují odlišný přístup než zkraty v obvodech střídavých. Standardy [9] , [10] a [11] se zabývají zkraty ve stejnosměrných instalacích vlastní spotřeby elektráren a stejnosměrných obvodech elektráren a rozvodných stanic. Přestože tyto instalace jsou důležitou součástí elektráren a stanic přenosové soustavy i distribučních soustav a spoluvytváří proto elektrizační soustavu (ES), je výpočet zkratových proudů ve stejnosměrných rozvodech natolik specifický, že pouze odkazujeme na uvedené normy. Zcela mimo oblast ES by byly výpočty zkratových proudů **v dopravních prostředcích** (automobily, vlaky, lodě, letadla). Norma [2] rovněž neplatí pro **zkušební zařízení**, ve kterých jsou zkraty úmyslně vytvářeny a řízeny (zkratovny).

Poměry při zkratu a jejich stanovení

Průběhy zkratových proudů v závislosti na čase (nebo jejich charakteristické hodnoty – parametry), jejich rozložení v soustavě a průběhy (nebo hodnoty) napětí ve vybraných bodech soustavy se souhrnně označují jako „**poměry při zkratu**“. (Pojem „poměry při zkratu“ nesmí být zaměňován s termínem „zkratový poměr“, který je jedním ze základních konstrukčních parametrů synchronních strojů a s výpočty zkratů přímo nesouvisí.) Poměry při zkratu lze zjišťovat měřením na skutečném zařízení nebo na modelu, zkouškami nebo výpočtem. Základním prostředkem pro určování poměrů při zkratu pro existující i projektovaná zařízení jsou výpočty, jejichž výsledky predikují, více či méně dokonale, chování skutečného zařízení na základě jeho matematického modelu. V současné době platné normy jsou převážně zaměřeny pouze na **výpočet zkratových proudů.**

Výpočty zkratových proudů

Proč se zkraty počítají

Výpočty zkratů se obvykle provádějí **v souvislosti s následujícími činnostmi**:

- **dimenzování elektrického zařízení** s ohledem na tepelné a silové (dynamické) účinky zkratového proudu
- **kontrola vypínačů** s ohledem na průběh zkratového proudu a parametry zotaveného napětí v místě instalace
- **návrh uzemňovacích soustav**, stanovení dotykových napětí (včetně krokových napětí) a zavlečených napětí
- **návrh** a kontrola činnosti **elektrických ochran** a jistících prvků
- **kontrola stability** paralelně pracujících synchronních strojů
- **kontrola napěťových poměrů**, při zkratu a při rozběhu pohonů s asynchronními motory
- **stanovení napětí indukovaných soustavami vvn nebo zvn** ve sdělovacích vedeních, v pláštích kabelů a v kovových potrubích uložených v zemi nebo na povrchu země
- **kontrola šíření a vlivu vyšších harmonických** v elektrizační soustavě
- posouzení výskytu **přepětí při zemních zkratech a zemních spojeních**
- **kontrola vhodnosti provozního zapojení** dílčích částí elektrizační soustavy

Matematický přístup

Podrobný a „co nejpřesnější“ **výpočet časového průběhu** složitého přechodného děje, kterým zkrat v elektrické soustavě tvořené zdroji, přenosovými cestami a spotřebiči zcela jistě je, vede na řešení soustavy diferenciálních rovnic, které popisují chování jednotlivých prvků soustavy. I při využití výpočetní techniky je tento postup pro zkrat v soustavě - sestávající z desítek a stovek zdrojů, spotřebičů různých druhů, vedení, transformátorů a dalších prvků – neschůdný. Prakticky se uplatňuje, s řadou přijatých zjednodušení, pouze při řešení vybrané části soustavy, například při analýze chování jednoho nebo několika málo synchronních strojů, při výpočtu zkratů ve vývodu generátoru nebo při analýze provozních přepětí. Ze všeobecného matematického popisu fyzikálních dějů se pro praktické řešení úlohy vybírají ty procesy, které umožňují inženýrské řešení problému Pro výpočet průběhu zkratového proudu ve vývodu generátoru lze zjednodušené analytické výrazy nalézt např. v 0, [3] , [13] nebo [14] .

Parametry zkratového proudu

Pro většinu aplikací zkratových výpočtů však, naštěstí, není nutné znát přesné průběhy zkratových proudů ve všech případech, které se mohou v provozu vyskytnout. Projektant či provozovatel potřebuje, aby navržené zařízení plnilo požadované funkce s dostatečnou spolehlivostí a bezpečností. Spokojí se proto s výpočtem jednodušším, jehož výsledkem jsou charakteristické hodnoty odpovídající mezním hodnotám možných průběhů zkratových proudů, tzv. **parametry zkratového proudu**.

Parametry, kterými může být charakterizován průběh zkratového proudu, jsou:

- **počáteční souměrný rázový zkratový proud** („initial symmetrical short-circuit current“) I''_k – kdysi bylo používáno i označení I_{ks}
- **nárazový zkratový proud** („peak short-circuit current“) i_p - v dávné minulosti někdy též označován jako „dynamický zkratový proud“ („making current“), dřívější a někdy ještě přežívající označení I_{km}
- **ekvivalentní oteplovací** proud („thermal equivalent short-circuit current“) I_{th} , pro dobu trvání zkratu T_K - dřívější a někdy ještě přežívající označení I_{ke} pro dobu t_k
- souměrný zkratový **vypínací** (dříve a zřejmě i správněji „vypínaný“) **proud** („symmetrical short-circuit breaking current“) I_b, určovaný obvykle pro minimální (nejkratší) dobu vypnutí t_{min} - dřívější označení I_{vyp} pro dobu t_{vyp}
- **stejnosměrná** (aperiodická) **složka zkratového proudu** („decaying (aperiodic) component of short-circuit current“) $i_{d.c.}$ – obvykle se určuje její maximální možná hodnota pro minimální dobu vypnutí t_{min} , dříve označovaná jako $I_{a\ vyp}$
- **ustálený zkratový proud** („steady-state short-circuit current“) I_k – může být ovlivněn buzením generátorů
- **účiník zkratového proudu** φ_k – je vyžadován v některých aplikacích pro zařízení nn, stejně jako poměr R/X nebo časová konstanta T_a charakterizuje **tlumení stejnosměrné složky zkratového proudu**

Přejdeme k obrázkům, na stranu 19!

Maximální, minimální a omezený zkratový proud

Při určování parametrů zkratového proudu se zkraty počítají pro nejméně příznivý případ, avšak s provozně přípustným zapojením. Pro dimenzování zařízení to jsou obvykle hodnoty odpovídající **maximálnímu zkratovému proudu**, pro návrh a kontrolu činnosti elektrických ochran a jistících prvků a ověřování rozběhu asynchronních motorů to mohou být hodnoty odpovídající **minimálnímu zkratovému proudu.** Při každém výpočtu zkratů pro dimenzování elektrického zařízení by měl být určován, mimo počáteční rázový zkratový proud I''_k, též alespoň nárazový zkratový proud i_p.

Pokud jsou k ochraně rozvodného zařízení použity pojistky nebo jističe omezující zkratový proud, spočítá se nejdříve předpokládaný počáteční souměrný rázový zkratový proud bez těchto přístrojů. Z tohoto zkratového proudu a omezovacích charakteristik pojistek nebo jističů se stanoví **parametry omezeného zkratového proudu**, kterým je namáháno zařízení za jistícím přístrojem.

Zjednodušující předpoklady, přibližné a upřesňující výpočty

Výpočty zkratových proudů jsou prováděny vždy s řadou zjednodušení a jejich výsledky jsou – ve srovnání s fyzikální realitou, více či méně přibližné Analýza „poměrů při zkratu“ by měla být v souladu s přesností vstupních údajů, použitými výpočetními prostředky a především v souladu s účelem výpočtu, tedy s tím, k čemu budou výsledky výpočtu sloužit.. Z nejčastějších zjednodušení můžeme uvést například tato:

- Při výpočtu zkratového proudu předpokládá **kovový zkrat**, neuvažuje se vliv elektrického oblouku v místě zkratu nebo přechodových odporů
- Po dobu trvání zkratu se nemění **typ zkratu**
- Po dobu zkratu nedochází k žádné **změně v síti**
- Uvažují se **jmenovité impedance** strojů a **jmenovité převody** transformátorů
- Zanedbávají se některé prvky **příčných admitancí** vedení a strojů
- Synchronní stroje s vyniklými póly se modelují jako **stroje s válcovým rotorem**
- Ke zkratu dojde **na nezatížené větvi při jmenovitém zatížení synchronního stroje**
- Neuvažuje se, nebo se uvažuje zjednodušeně, **vliv změn v budícím obvodu** stroje během zkratu
- Dříve též: výpočet se provádí **pouze s rezistancemi** (sítě nn) nebo **pouze s reaktancemi** (sítě vvn) vedení

Přijatá zjednodušení bývají volena obvykle tak, aby zásadně výpočet neovlivnila, nebo aby výsledky výpočtu byla konzervativní, tedy na straně bezpečnosti. Provádění **přibližného výpočtu** hodnot zkratového proudu je oprávněno tím, že již samotná používaná vstupní data nejsou a nemohou být zcela přesná. Výpočet se provádí v podmínkách nejistoty či neurčitosti informací o dlouhodobém vývoji soustavy, zařízení přitom musí obvykle vyhovět po celou dobu své životnosti, tedy i v období, pro které můžeme jen stěží předvídat vstupní údaje potřebné pro výpočet. Přitom rozvodná zařízení a elektrické přístroje se vyrábějí pro odstupňované hodnoty zkratových odolností.

Při kontrole existujícího zařízení, které již je v provozu delší dobu a je provozováno za okolností lišících se od předpokladů přijatých při jeho návrhu, se ovšem mohou uplatnit podrobnější, **upřesňující výpočty**. Upřesňující výpočet může oddálit požadavek rekonstrukce zařízení s ohledem na vzrůst zkratových proudů. Dnes již historický, ale stále platný, standard ČSN 33 3015 „Zásady dimenzování podle elektrodynamické a tepelné odolnosti při zkratech“ z roku 1983 (norma RVHP - ST SEV 2726-80) v některých případech dokonce připouští, aby zkratová odolnost zařízení byla menší než očekávané hodnoty zkratových proudů. Tento přístup vychází ze srovnání pravděpodobnostního rozložení dosahovaných zkratových proudů s maximálními hodnotami zkratů určenými výpočtem pro mezní, nejméně příznivé stavy, vyskytující se s malou četností.

Některé postupy a metody používané při výpočtech zkratů

Pro určení parametrů zkratových proudů byla v průběhu doby vypracována řada více či méně zjednodušených postupů.

Rozklad do souměrných složkových soustav

Při výpočtu **nesouměrných zkratů** se vychází z metody **rozkladu do souměrných složkových soustav**: sousledné, zpětné a netočivé.

Zkratové křivky pro typový stroj a analytický výpočet blízkého zkratu

Pro výpočet **zkratu elektricky blízkého synchronnímu stroji** byly vypracovány pro „typové stroje“ **zkratové křivky, prezentované ve formě diagramů nebo tabulek**, nebo je prováděn **analytický výpočet,** s použitím vzorců. Při elektricky blízkém zkratu se může uplatnit rozdílnost elektrických parametru stroje v podélné a příčné ose, vliv napěťové regulace synchronních generátorů, vysoký podíl stejnosměrné složky zkratového proudu v okamžiku jeho vypínání a vliv pracovního bodu při provozu stroje před zkratem – některé postupy však tyto vlivy neuvažují.

Problematika „společné cesty“

Rozdílný může být také **přístup k problematice „společné cesty“** zkratových příspěvků z různých zdrojů zkratových proudů, který je třeba uplatnit při řešení zkratů v zauzlených, tzv. **mřížových sítí**ch. V nejjednodušším případě si tento problém můžeme demonstrovat na zapojení sítě do trojcípé hvězdy, kdy zkrat na konci jednoho ramene je napájen ze dvou zdrojů s odlišnými parametry, tedy s různým časovým průběhem proudu při zkratu na svorkách stroje (Obr.4). Jednoduchými postupy, bez iteračních výpočtů, můžeme analyticky určit pouze počáteční souměrný rázový zkratový I''_k, nikoliv však další parametry zkratového proudu, závislé na rychlosti zániku střídavých a stejnosměrných složek z obou zdrojů. Po provedení transfigurace schématu z hvězdy na trojúhelník sice společnou cestu zkratových příspěvků do místa zkratu odstraníme, ale oba zdroje zkratového proudu jsou vzájemně propojeny třetí stranou trojúhelníkové sítě. Časový průběh zkratových příspěvků do místa zkratu je ovlivněn vyrovnávacími proudy protékajícími touto větví a časové konstanty zániku jednotlivých složek zkratových proudů nelze proto z parametrů obvodu na počátku zkratu jednoduše stanovit.

Metoda superpozice

Fyzikálně odůvodněný a relativně „přesný“ výpočet rozložení symetrických zkratových proudů v okamžiku vzniku zkratu, tedy určení hodnot I_k'' v místě zkratu i v jednotlivých větvích schématu, vychází z **metody superpozice**, jak je prezentována např. v [3] .

Výpočet zkratů přitom **navazuje na výpočet rozložení proudů a napětí v soustavě před zkratem** („load-flow analysis“). Je tedy třeba vycházet ze znalosti odběrů a zatížení zdrojů v ustáleném chodu soustavy. Ze známých hodnot vektorů napětí na svorkách generátorů, jejich proudového zatížení a vnitřních impedancí se pak stanoví vnitřní napětí generátorů a rozložení napětí a proudů v soustavě při zkratu. Výpočtem, obvykle prováděným výpočetním programem s využitím počítače, se ovšem neurčuje časový průběh zkratových proudů (jejich střídavých a stejnosměrných složek). Při modelování synchronních generátorů jejich vnitřní rázovou reaktancí X_d'' je výsledkem výpočtu **rozložení počátečních rázových zkratových proudů** I_k'', ze kterých se odvozuje nárazový zkratový proud i_p. Pro různé rozdělení zátěže na jednotlivé generátory se ovšem dostávají též různá vnitřní napětí generátorů a tedy také různé hodnoty zkratového proudu pro jedno a totéž místo zkratu. **Vypočtená hodnota proto nemusí být pro dané místo zkratu ta nejméně příznivá**. Pro získání, pokud možno, nejméně příznivých hodnot je třeba zadat vhodné rozložení a zatížení zdrojů i odběrů, což je úloha řešená převážně empiricky.

Závislost výpočtu zkratů na předchozím výpočtu chodu sítě v ustáleném stavu odstraňují některé výpočetní postupy tím, že u všech modelovaných generátorů předpokládají jejich zatížení jmenovitým výkonem, vliv odběrů na rozložení zkratových proudů je zanedbán. Dalšího zjednodušení může být dosaženo tím, že se u všech generátorů definuje stejné poměrné vnitřní napětí za rázovou reaktancí E_d'' zavedením součinitele „respektování vlivu předchozího zatížení“ k (např. pro zkrat v soustavě k=1,1 pro stroj zatížený, k=1,0 pro stroj nezatížený). Při těchto zjednodušeních se výpočet „metodou superpozice“ silně přibližuje výpočtu „metodou ekvivalentního napěťového zdroje v místě zkratu“.

Metoda ekvivalentního napěťového zdroje v místě zkratu

Standardní postup výpočtu zkratů podle platných norem a technických zpráv [2] , [3] , [5] , [6] a [7] je založen na **metodě ekvivalentního napěťového zdroje** situovaného **v místě zkratu**, který je jediným zdrojem napětí v soustavě. Všechny ostatní prvky jsou nahrazeny svými zkratovými impedancemi a místo vnitřních napětí zdrojů zkratového proudu jsou uvažovány zkratující spoje. Napětí ekvivalentního napěťového zdroje je odvozeno ze jmenovitého (fázového) napětí sítě v místě zkratu vynásobením napěťovým součinitelem *c*. Zavedení tohoto součinitele je v normě [2] zdůvodňováno kolísáním napětí v závislosti na čase a místě, přepínáním odboček transformátorů, zanedbáním zátěže a kapacitních reaktancí a chováním generátorů a motorů při přechodném ději. Při výpočtu maximálních zkratů se používá napěťový součinitel c_{max} , který v podstatě odpovídá dovolenému nejvyššímu napětí pro zařízení na dané napěťové hladině a v normě doporučené hodnoty jsou 1,05 a 1,10. Pro výpočet minimálních zkratových proudů norma uvádí pro součinitel c_{min} hodnotu 0,95 pro zkrat v síti nn a 1,00 pro zkrat v sítích vyšších napětí.

Při použití metody ekvivalentního napěťového zdroje v místě zkratu odpadá nutnost provádět výpočty toků výkonů v různých stavech před zkratem. Postradatelné jsou údaje o odběrech, poloze přepínače odboček transformátorů, buzení generátorů apod. Vzhledem k tomu, že vnitřní napětí zdrojů mohou být odlišná od napětí ekvivalentního zdroje v místě zkratu a transformátory bývají vybaveny přepínatelnými odbočkami, musí se impedance generátorů, síťových transformátorů a elektrárenských bloků při výpočtu zkratových proudů korigovat příslušnými korekčními součiniteli.

Použití metody superpozice a metody ekvivalentního zdroje

K **charakterizování obou postupů** sloužících ke stanovení hodnot počátečního rázového souměrného zkratového proudu I_k'' lze uvést: V minulosti byla **metoda superpozice** přednostně používána pří výpočtech rozsáhlých přenosových a distribučních sítí, ve kterých se neuplatňuje elektrická blízkost synchronních strojů a vliv asynchronních motorů a které mohly být, i při některých dalších zjednodušeních (v sítích vvn a zvn byly uvažovány pouze podélné reaktance prvků) s přiměřenou pracností prováděny pouze s nasazením výpočetní techniky. **Metoda ekvivalentního napěťového zdroje v místě zkratu** se zase blíží postupům, které byly používány pro výpočet zkratů v průmyslových rozvodech, vlastní spotřebě elektráren a elektrických stanic, často pouze s nejjednoduššími výpočetními prostředky. Její aplikace podle platné normy bez využití výpočetního programu je sice možná, ale v dnešní době již těžko představitelná. Hlavní předností této metody je to, že nevyžaduje předchozí výpočet proudů a napětí v ustáleném stavu před vznikem zkratu. K dalším výhodám patří relativní jednoduchost a standardizace, která ujednocuje i další procedury pro určení všech požadovaných parametrů zkratového proudu.

Nejen metoda výpočtu, ale i jeho rozsah a způsob zpracování, volba míst zkratu, typu zkratu a požadavky na zjištění těch či oněch parametrů zkratového proudu závisí především na účelu, ke kterému mají být výsledky výpočtu zkratových proudů využity. Například výpočet maximálních zkratových proudů sám o sobě je pouhým „uměním pro umění“ a nemá žádnou vypovídací schopnost, není-li provedeno navazující srovnání získaných výsledků se zkratovou odolností zařízení, nebo porovnání s výsledky výpočtu pro alternativní zapojení, nebo nejsou-li výsledky jinak využity, například pro návrh nebo kontrolu dimenzování či kontrolu činnosti některých prvků. Žádný standard ovšem rozsah výpočtu, jeho způsob zpracování, doložení použitých vstupních hodnot a výsledků výpočtu, případně jejich aplikaci pro konkrétní elektrické zařízení, nepředepisuje. Definování těchto požadavků je tedy předmětem dohody mezi objednatelem a zpracovatelem výpočtu.

Něco z historie norem pro výpočty zkratů

Původní normy ČSN

Problematika zkratů se vynořila již s počátkem elektrizace, především v souvislosti s návrhem hlavních parametrů elektrického zařízení, s jeho dimenzováním. Výpočet počátečního rázového souměrného zkratového proudu I''_k v jednoduchém obvodu v podstatě spočívá v aplikaci Ohmova zákona na výpočtovou impedanci, při znalosti vnitřního napětí a vnitřní impedance zdroje. Pro technickou potřebu byla v průběhu doby vypracována celá řada praktických postupů, lišících se nejen mírou zjednodušení. Výpočet byl často prováděn s využitím procentních nebo poměrných hodnot impedancí při zvoleném vztažném výkonu, jeho výstupem pak byly zkratové proudy nebo zkratové výkony.

Snaha sjednotit rozdílné přístupy používané jednotlivými subjekty v různých oblastech hospodářství se promítla do postupné standardizace výpočtu zkratů (ČSN 305 z února 1952, ČSN 38 1754 „Stavba transformoven a rozvoden vn“ z roku 1957). **V roce 1960 byla vydána ČSN 38 0411** „Výpočet poměrů při zkratech v trojfázové elektrizační soustavě“, jako doporučená norma**, upravená a doplněná změnou v roce 1970**. Podle této normy byla navržena celá řada dosud provozovaných zařízení a norma byla v technické praxi využívána i po jejím zrušení až do 90. let minulého století. Výpočet bylo možné provádět s poměrnými nebo procentními impedancemi, nebo se skutečnými hodnotami impedancí. Pro tehdejší jmenovitá napětí sítí a přístrojů (0,220 - 0,380 – 0,500 – 3 – 6 – 10 – 15 – 22 – 35 – 110 – 220 – 380 a později 400 kV) norma definovala řadu výpočtových napětí (0,23 – 0,400 – 0,525 – 3,15 – 6,3 – 10,5 – 15,75 – 23,00 – 36,75 – 115 – 230 – 400 kV). Fiktivní převody transformátorů odpovídaly výpočtovým napětím, takže se zjednodušil přepočet impedancí z jedné napěťové hladiny na druhou. Při zběžném výpočtu bylo možné provést výpočet pouze s reaktancemi nebo jen s činnými odpory. Nárazový zkratový proud I_{km} se odvozoval z počátečního souměrného rázového zkratového proudu podle poměru R/X zkratového obvodu, nebo pomocí součinitele K udaného v tabulce pro různá místa zkratu. Obdobným postupem se určoval i ekvivalentní oteplovací proud tabulkovým součinitelem, jehož hodnota závisela na místě a délce trvání zkratu. Příspěvek od asynchronních motorů se uvažoval pouze při výpočtu nárazového (dynamického) zkratového proudu. V soustavách nn se vypočtené hodnoty zkratových proudů redukovaly o 15 až 25 % s ohledem na vnitřní impedanci přístrojů a spojů nn. Pro upřesňující výpočty a stanovení průběhu zkratových proudů norma obsahovala tabulky a křivky poměrných hodnot odvozených pro typový turboalternátor a typový hydroalternátor. V normě byly též vztahy pro zjednodušování náhradního schématu a řada řešených příkladů.

V roce 1981 byl zveřejněn návrh normy k ověření (s modrým pruhem) ČSN 33 3020 „Výpočet poměrů při zkratech v trojfázové elektrizační soustavě“. Zpracovatelem návrhu byl Doc. Ing. František Němeček, CSc., z Elektrotechnické fakulty ČVUT. Návrh přepracoval velice důsledně a komplexně „starou“ ČSN 38 0411. Byl založen na metodě součinitelů (pro elektricky vzdálené zkraty), pro zkraty elektricky blízké synchronnímu stroji byly v normě tabulky vypočtené pro typový generátor. Ponechával výpočtová napětí a fiktivní převody transformátorů, požadoval podrobnější zahrnutí vlivu asynchronních motorů. Vypočet podle této normy měl sloužit k rychlému zjištění zkratových poměrů. Pokud by výsledky nebylo možno považovat za dostačující, měl by se provést výpočet některou z přesnějších metod (výpočet pomocí matematického modelu respektujícího zatížení v soustavě před poruchou, výpočet vycházející z řešení soustavy diferenciálních rovnic.) V praxi se návrh nevžil, pro většinu techniků byl asi, ve srovnání s platnou ČSN 38 0411, málo praktický a „nedotažený“.

ČSN 33 3020 „Výpočet poměrů při zkratech v trojfázové elektrizační soustavě“ z roku 1988. Normu zpracoval ing. Vladislav Reimar (Energoprojekt Praha). Podle tehdy platného systému ČSN byla normou závaznou. Oproti předchozímu návrhu normy k ověření došlo k podstatným úpravám, zahrnuty byly již některé postupy podle návrhu mezinárodní normy IEC 909. Pro řešení zkratu elektricky blízkého alternátoru byly v normě analytické vzorce pro výpočet „zkratových násobitelů“. Při praktickém používání této normy byla zjištěna řada tiskových chyb a některé nedostatky metodické. Ve druhém vydání normy byla převážná část tiskových chyb odstraněna, metodické nedostatky však zůstaly. (Jednalo se např. o způsob respektování asynchronních motorů jedním ekvivalentním motorem, jehož zkratový příspěvek se uplatňuje společně s příspěvkem z nadřazené sítě, vliv společné cesty zkratových příspěvků různého charakteru, použití fiktivních převodů transformátorů odpovídajících jmenovitým napětím sítí, výpočet zjednodušenými vzorci při stanovování hodnoty Jouleova integrálu a chyby ve vztazích pro výpočet parametrů elektricky blízkého zkratu.)

ČSN 33 3020 „Výpočet poměrů při zkratech v trojfázové elektrizační soustavě“ z roku 1992. V roce 1989 zpracoval ing. Josef Vokál (Energoprojekt Praha) návrh změny ČSN 33 3020 z roku 1988, který sledoval tyto cíle:

- odstranit tiskové chyby
- provést metodické úpravy s ohledem na praktické zkušenosti při provádění výpočtů
- upravit způsob respektování asynchronních motorů
- zdůraznit v textu normy místa, kde výpočet může být prováděn, v souladu s jeho účelem a použitými výpočetními prostředky, různým způsobem
- podle možnosti ověřit některé vztahy a upřesnit a doplnit orientační hodnoty parametrů a koeficientů
- uvést výpočet do vztahu s postupem podle IEC 909, umožnit provádění výpočtu podle zásad IEC 909 a IEC 865

Návrh změn přitom musel respektovat uspořádání a členění ČSN 33 3020 z roku 1988. Po připomínkovém řízení byl zpracován konečný návrh normy se zapracovanými změnami, v září 1990 byl předán Úřadu pro normalizaci a měření, který jej vydal v září 1992 jako revidovanou normu. Tato norma platila do 1.7.2004, jejím zrušením se plně v této oblasti přešlo na normy IEC a EU, zaváděné do soustavy ČSN překladem.

Publikace IEC

Počínaje rokem 1988 vydalo IEC řadu publikací (norem a technických informací nebo zpráv), vypracovaných Technickou komisí 73 této organizace, které se zabývají výpočty zkratových proudů a jejich účinků:

- IEC 909:1988 „Short-circuit current calculation in three-phase a.c. systems“. Základní norma pro výpočet zkratových proudů. Nahrazena revidovanou normou IEC 60909-0:2001
- IEC 781:1989 „Application guide for calculation of short-circuit currents in low-voltage radial systems“. Již dříve připravovaná publikace IEC, dnes prakticky bez významu.
- IEC 909-1:1991 „Factors for the calculation of short-circuit currents in three-phase a.c. systems according to IEC 909“. Důležitá technická informace, vysvětlující a doplňující některé postupy v IEC 909. Nahrazena revidovaným vydáním technické zprávy IEC TR 60909-1:2002.
- IEC 909-2:1992 „Electrical equipoment. Data for short-circuit calculations in accordance with IEC 909“. Technická informace obsahující soubory výchozích údajů pro výpočty a typické parametry některých zařízení. Nahrazena revidovanou normou.
- IEC 865-1:1993 „Short-circuit currents. Calculation of effects. Part 1: Definitions and calculation methods“. Druhé vydání, které ruší a nahrazuje první vydání z roku 1986. Norma se zabývá výpočtem silových účinků na tuhé vodiče i lanové vodiče a tepelných účinků na holé vodiče a elektrické přístroje. V roce 2010 byl předložen ke schválení návrh třetího revidovaného vydání, jako norma IEC 60865-1.
- IEC 60865-2:1994 „Short-circuit currents. Calculation of effects. Part 2: Examples of calculations“. Technická zpráva s příklady výpočtu silových a tepelných účinků zkratových proudů.
- IEC 60909-3:1995 „Short-circuit currents in three-phase AC systems – Part 3: Currents during two separate simultaneous line-to-earth short circuits and partial currents flowing through earth“. Norma nahrazena druhým vydáním IEC 60909-3:2003 a poté třetím vydáním IEC 60909-3:2009.
- IEC 61660-1:1997 „Short-circuit currents in d.c. auxiliary installations in power plants and substations – Part 1: Calculation of short-circuit currents“.

- IEC 61660-2:1997 „Short-circuit currents in d.c. auxiliary installations in power plants and substations – Part 2: Calculation of effects“.
- IEC 61660-3:2000 „Short-circuit currents in d.c. auxiliary installations in power plants and substations – Part 3: Examples of calculations“.
- IEC TR 60909-4:2000 „Short-circuit currents in three-phase a.c. systems – Part 4: Examples for the calculation of short-circuit currents“. První vydání dlouho čekávaných příkladů výpočtů podle IEC 909. Tato technická zpráva byla vydána dříve než druhé, revidované vydání základní normy IEC 60909-0:2001, příklady však jsou zřejmě již upraveny podle revidované normy.
- IEC 60909-0:2001 „Short-circuit currents in three-phase a.c. systems – Part 0: Calculation of currents“. Norma nahrazuje první vydání IEC 909-0:1988.
- IEC TR 60909-1:2002 „Short-circuit currents in three-phase a.c. systems – Part 1: Factors for the calculation of short-circuit currents in three-phase a.c. systems according to IEC 909.“. Norma nahrazuje první vydání IEC 909-1:1991.
- IEC 60909-3:2003 „Short-circuit currents in three-phase a.c. systems – Part 3: Currents during two separate simultaneous line-to-earth short circuits and partial currents flowing through earth“. Norma nahrazuje první vydání IEC 60909-3:1995, byla však již nahrazena třetím vydáním IEC 60909-3:2009.
- IEC TR 60909-2:2008 „Short-circuit currents in three-phase a.c. systems – Part 2: Data of electrical equipment for short-circuit current calculations“. Tato technická zpráva nahrazuje IEC 909-2:1992.
- IEC 60909-3:2009 „Short-circuit currents in three-phase a.c. systems – Part 3: Currents during two separate simultaneous line-to-earth short circuits and partial currents flowing through earth“. Norma nahrazuje druhé vydání IEC 60909-3:2003.
- IEC 60865-1:2011 „Short-circuit currents. Calculation of effects. Part 1: Definitions and calculation methods“. Třetí vydání, které ruší a nahrazuje druhé vydání z roku 1986. Norma se zabývá výpočtem silových účinků na tuhé vodiče i lanové vodiče a tepelných účinků na holé vodiče, část zabývající se tepelnými účinky na elektrické přístroje je vypuštěna. V současnosti se připravuje vydání českého překladu jako druhé vydání ČSN EN 60865-1.

Obrázky a teoretické základy k výpočtům zkratů

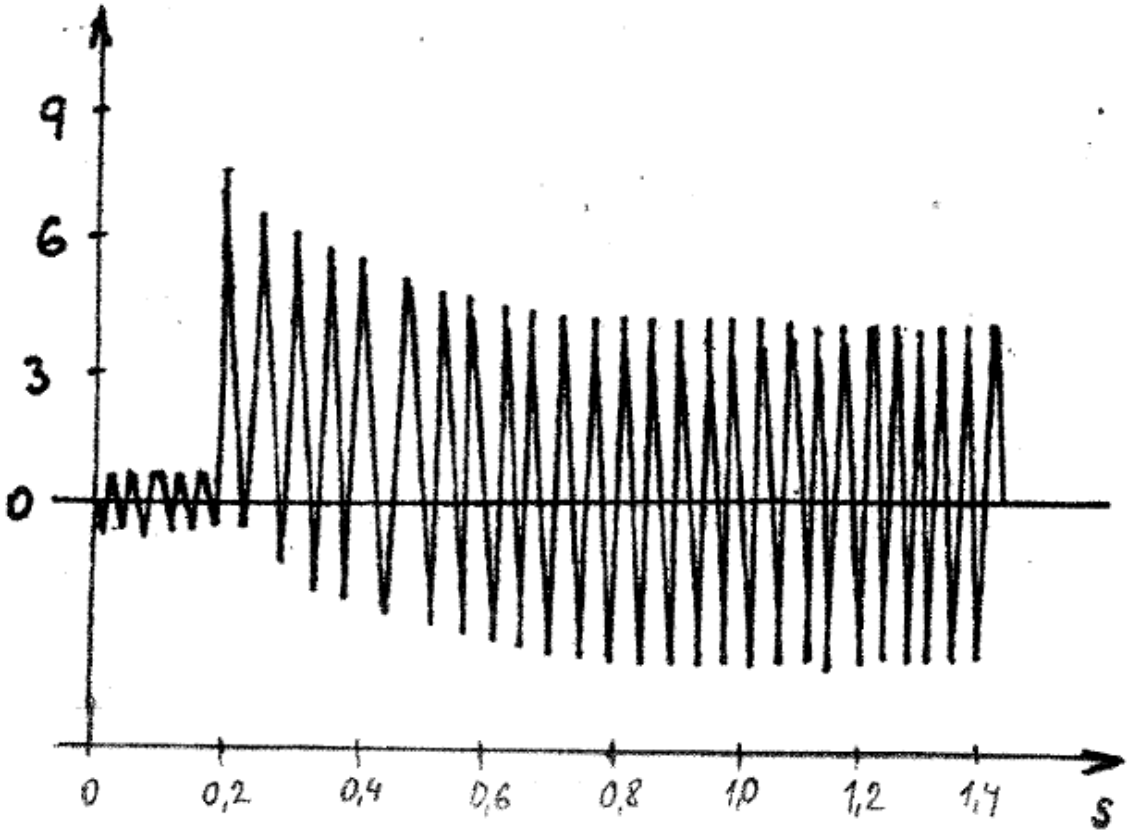
Používaná symbolika

V této kapitole je upřednostněno tradiční české označování fyzikálních veličin a parametrů zkratového proudu, tak, jak bylo použito v normě ČSN 33 3020 z roku 1992 a jak je dosud často používáno v naší odborné literatuře. Současně je však upozorněno na odlišnosti symboliky podle norem IEC, jak je prezentována v kapitole 5 „Výpočet zkratových proudů podle platných norem“. Porovnání obou symbolik pro výrazy použité v této kapitole je v následující tabulce. Pro označení komplexních veličin je v obou případech použito podtržení – dřívější symbolika upřednostňovala „stříšku“. V textu zařazené příklady jednoduchých elektrických obvodů mají osvětlit postupy praktického výpočtu zakotveného v normách a nezahrnují problematiku nesouměrných zkratů.

Symbol		Význam symbolu
„tradiční“	**podle IEC**	
$i_k(t)$	*nepoužívá se*	Průběh zkratového proudu v závislosti na čase
I''_k	I''_k	Počáteční souměrný rázový zkratový proud (efektivní hodnota)
I_k	I_k	Ustálený zkratový proud
I_{km}	i_p	Nárazový zkratový proud
I_{ke}	I_{th}	Ekvivalentní oteplovací proud
I_{vyp}	I_b	Vypínací zkratový proud (symetrický, střídavá složka)
$I_{a\ vyp}$	*nepoužívá se*	Stejnosměrná (aperiodická) složka vypínacího zkratového proudu
i_a	$i_{d.c.}$	Stejnosměrná (aperiodická) složka zkratového proudu
i_{st}	$i_{a.c.}$	Střídavá (symetrická) složka zkratového proudu
t_k	T_k	Doba trvání zkratu

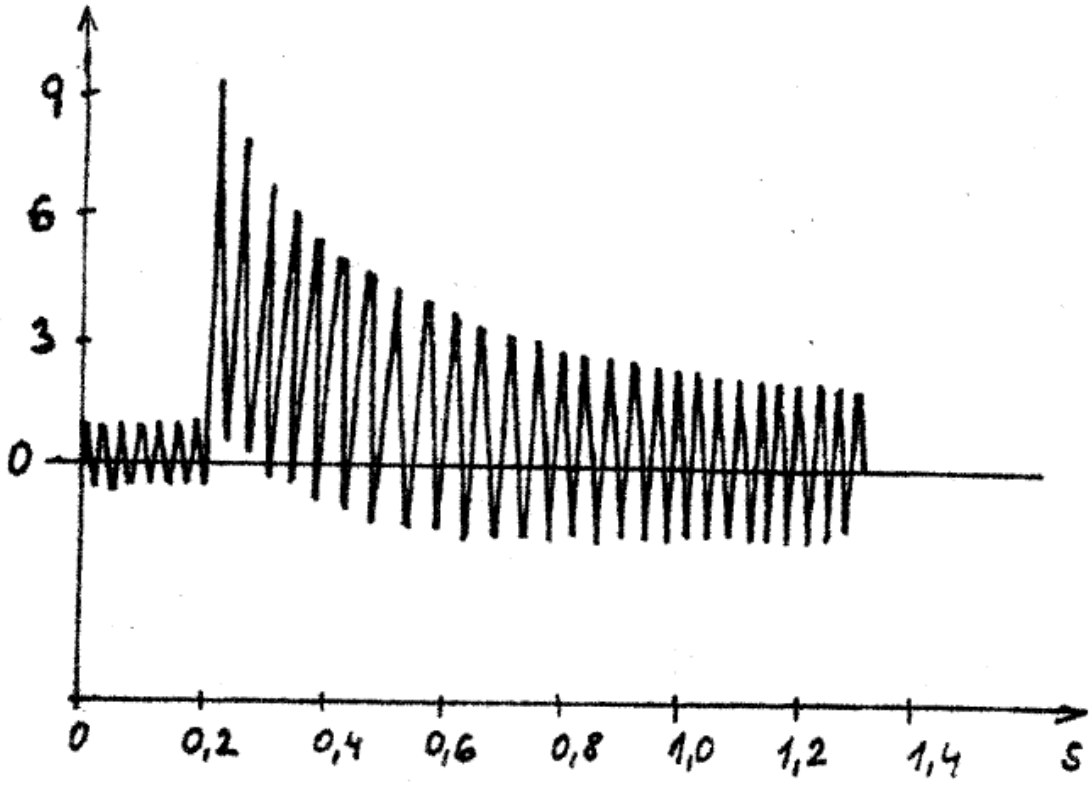
Symbol		Význam symbolu
„tradiční“	podle IEC	
t_{min}	t_{min}	Nejkratší doba vypnutí
$E''_d / \sqrt{3}$	E''	Rázové (subtranzitní) napětí synchronního stroje, fázové
$cU_n/\sqrt{3}$	$cU_n/\sqrt{3}$	Napětí ekvivalentního zdroje (efektivní hodnota)
U_n	U_n	Jmenovité napětí soustavy, sdružené (efektivní hodnota)
U_{nG}	U_{rG}	Jmenovité napětí synchronního stroje, sdružené (efektivní hodnota)
U_{nM}	U_{rM}	Jmenovité napětí asynchronního motoru
I_{nG}	I_{rG}	Jmenovitý proud synchronního stroje
c	c	Napěťový součinitel
K	κ	Součinitel nárazového zkratového proudu
μ	μ	Součinitel pro výpočet souměrného zkratového vypínacího proudu
Z	Z	Impedance
Z_V	*nepoužívá se*	Vnější impedance
Z_G	Z_G	Impedance synchronního stroje
Z_M	Z_M	Impedance asynchronního motoru
R_{st}	R_G	Střídavá rezistance synchronního stroje
R_M	R_M	Rezistance asynchronního motoru
R^1	R'	Rezistance na jednotku délky vedení
X''_d	X''_d	Rázová (subtranzitní) reaktance synchronního stroje (nasyc. hodnota), podélná
X'_d	*nepoužívá se*	Přechodná (tranzitní) reaktance synchronního stroje, podélná
X_d	X_d	Synchronní reaktance (nenasycená hodnota), podélná

Symbol		Význam symbolu
„tradiční“	podle IEC	
X_M	X_M	Reaktance asynchronního motoru
X^l	X'	Reaktance na jednotku délky vedení
I'_d	*nepoužívá se*	Počáteční hodnota přechodného zkratového proudu (efektivní hodnota)
f	f	Frekvence *(Norma IEC platí pro 50 i 60 Hz)*
T_a	*nepoužívá se*	Časová konstanta zániku stejnosměrné složky zkratového proudu
T'_d	*nepoužívá se*	Časová konstanta zániku přechodné (tranzitní) složky zkratového proudu
T''_d	*nepoužívá se*	Časová konstanta zániku rázové (subtranzitní) složky zkratového proudu
T'_{kM}	*nepoužívá se*	Přechodná časová konstanta asynchronního motoru
I_Z	I_{LR}	Souměrný záběrový proud asynchronního motoru



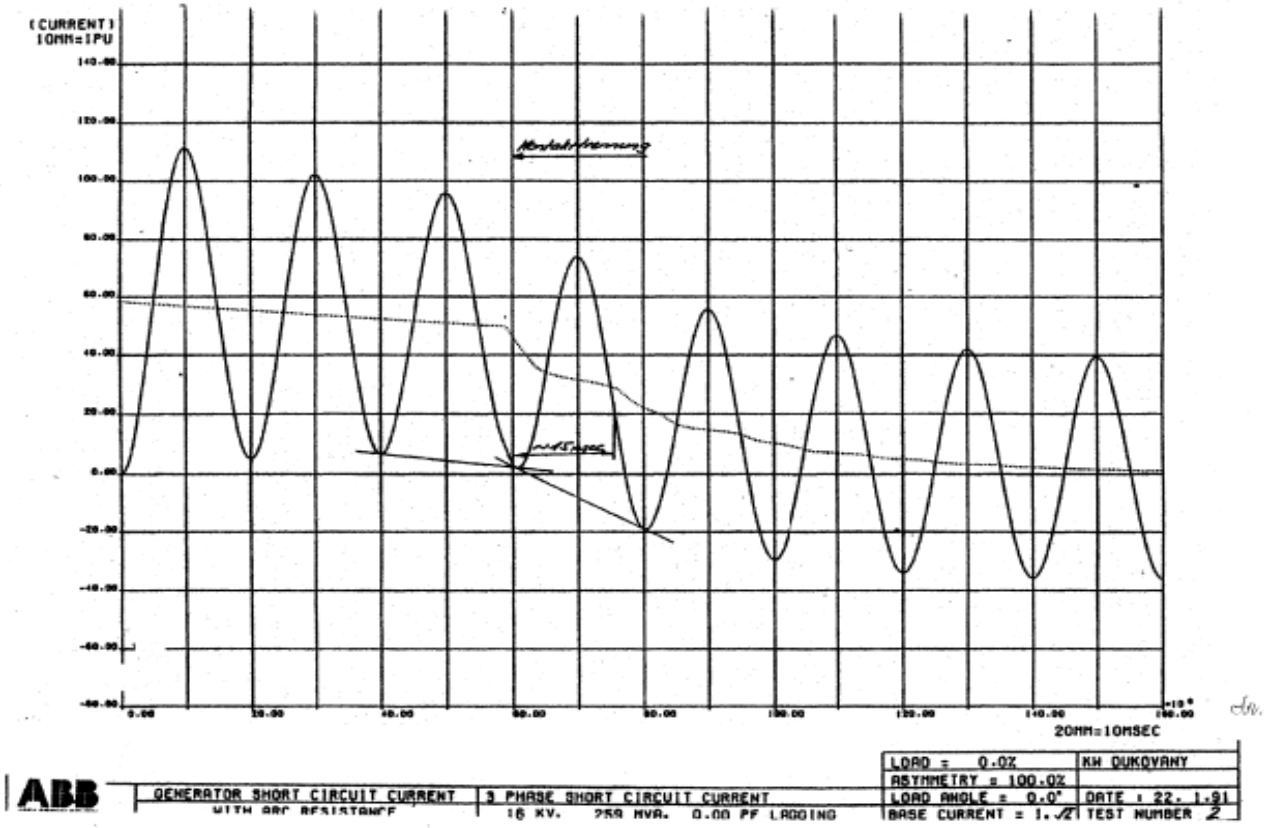
Obr.1 Průběh zkratového proudu při zkratu elektricky vzdáleném

Při elektricky vzdáleném zkratu podle Obr.1 má souměrná (střídavá) složka zkratového proudu v podstatě stálou velikost, s časem se nezmenšuje.



Obr.2 Průběh zkratového proudu při zkratu elektricky blízkém

Při zkratu elektricky blízkém, znázorněném na Obr.2, se velikost souměrné (střídavé) složky zkratového proudu mění. Podle normy [2] se za zkrat elektricky blízký považuje zkrat, při kterém příspěvek alespoň jednoho synchronního stroje k předpokládanému počátečnímu souměrnému rázovému zkratovému proudu překračuje dvojnásobek jmenovitého proudu stroje, nebo zkrat, při kterém příspěvek asynchronních motorů nelze zanedbat, protože překračuje 5 % počátečního souměrného zkratového proudu I_k'' bez motorů.

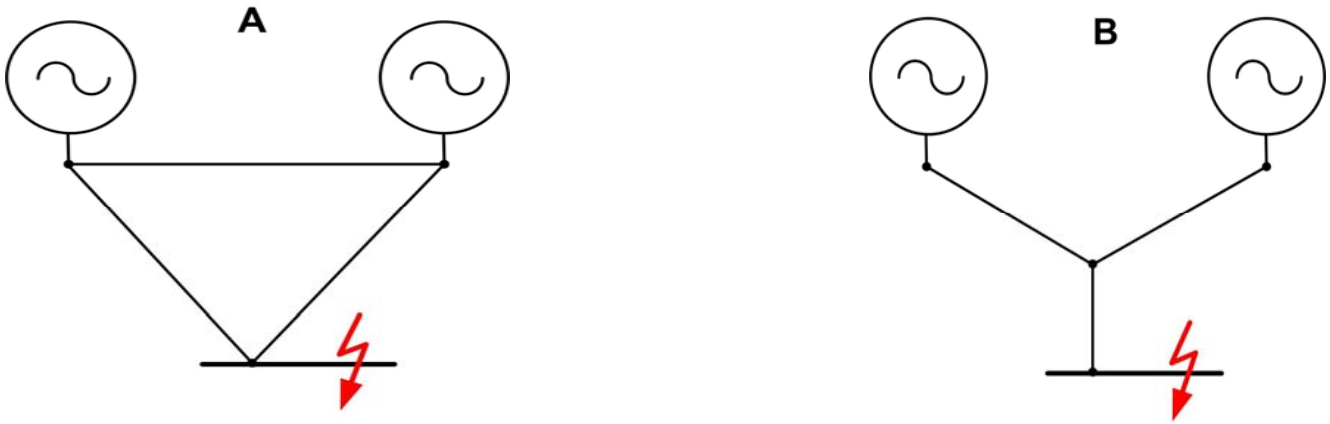


Obr.3 Příklad výsledku výpočtu průběhu zkratového proudu ve vývodu generátoru

Na Obr.3 je výsledek výpočtu průběhu zkratového proudu při elektricky blízkém trojfázovém zkratu. Výpočet provedla firma ABB Zürich pro vypínač ve vývodu generátoru, s respektováním **vlivu oblouku ve vypínači**. Vlivem odporu oblouku dochází k rychlejšímu zániku stejnosměrné složky zkratového proudu – pokud by nebyl odpor oblouku do výpočtu zahrnut, zkratový proud by procházel „přirozenou nulou“ později.

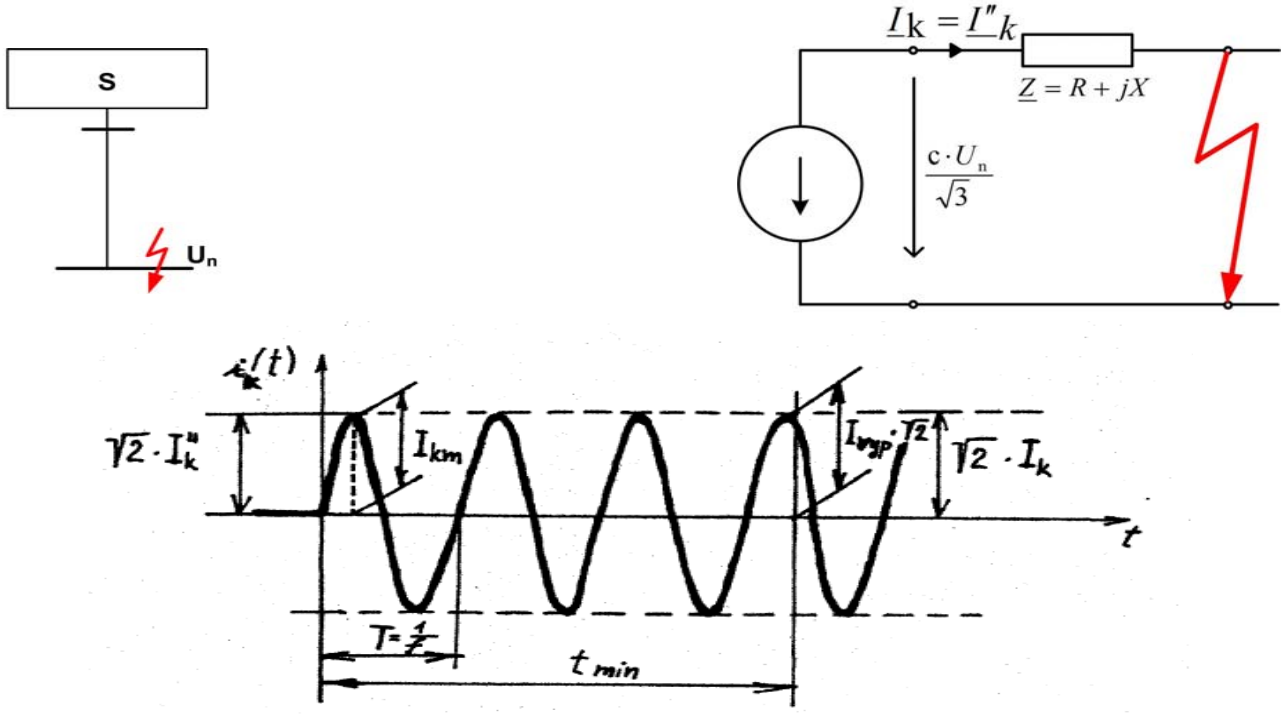
Chování synchronního stroje obecně popisuje soustava rovnic (Parkovy rovnice), ze kterých lze odvodit i „vzorečky“ pro výpočet průběhu zkratového proudu při zkratu ve vývodu generátoru **pro různé parametry ustáleného chodu před zkratem**.

Pro složitější zapojení s více zdroji zkratového proudu je však již nutné použít výpočetní program. Na Obr.4 je příklad zapojení, pro která lze určit průběh zkratového proudu jednoduchými výpočetními prostředky pouze tehdy, jestliže oba zdroje zkratového proudu jsou elektricky shodné. Pokud tomu tak není, protéká v zapojení A spojovacím vedením mezi oběma zdroji vyrovnávací proud a výsledný zkratový proud není dán prostým součtem proudů těchto zdrojů. Zapojení A lze transfigurovat na zapojení B, ve kterém přitéká do zkratu proud od různých zdrojů „společnou cestou“. Pro případy „mřížových sítí“ a sítí se „společnou cestou“ zkratových příspěvků jsou proto v normách pro praktické výpočty zkratů definovány zjednodušené postupy, umožňující stanovení požadovaných parametrů zkratového proudu, obvykle na straně bezpečnosti.



Obr.4 K otázce stanovení průběhu zkratového proudu jednoduchými prostředky

Průběhy zkratového proudu a jeho složek v jednoduchém zkratovém obvodu při elektricky vzdáleném zkratu jsou na Obr.5 a Obr.6. Průběh zkratového proudu v uvažovaném obvodu vyplývá z **řešení diferenciální obvodové rovnice** s příslušnými okrajovými (počátečními) podmínkami. Pokud dojde ke zkratu v takovém okamžiku, že **zkratový proud plynule naváže** na proud procházející obvodem před zkratem (bez skokové změny), nevyvine se stejnosměrná složka zkratového proudu, zkratový proud **má pouze střídavou složku.**



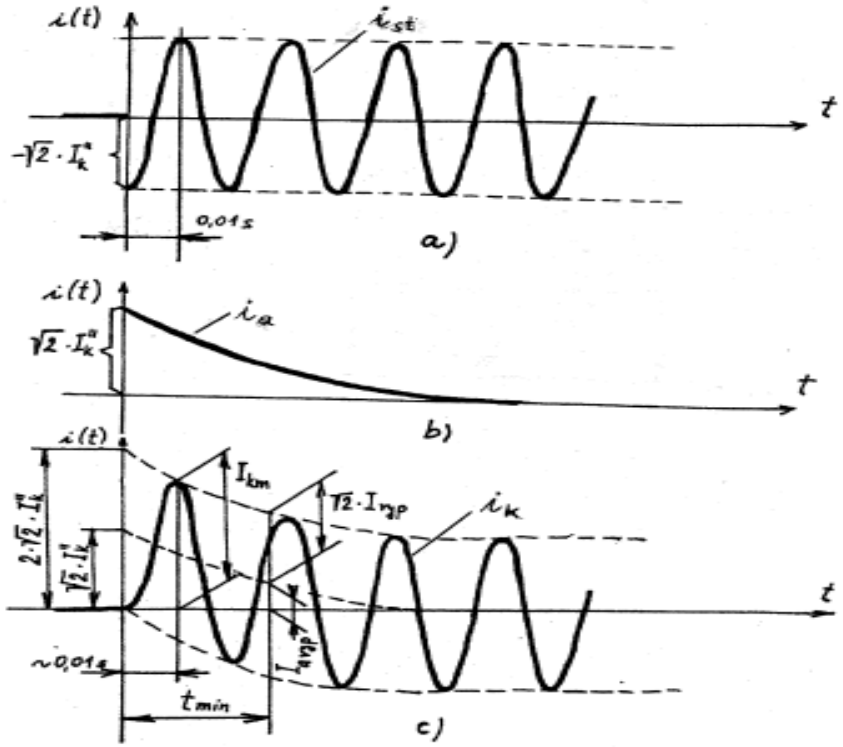
Obr.5 Elektricky vzdálený zkrat bez vzniku stejnosměrné složky

Předpoklad návaznosti průběhu střídavé složky zkratového proudu na počátku zkratu na předchozí hodnotu proudu ovšem nebývá obecně splněn. V takovém případě se vyvine **časem zanikající stejnosměrná složka zkratového proudu o takové počáteční velikosti, která zabezpečí návaznost výsledného průběhu zkratového proudu na proud procházející obvodem před zkratem**, jak je naznačeno na Obr.6. Průběh složek zkratového proudu a jeho charakteristické hodnoty podle Obr.6 pro shodný elektrický obvod jako je na Obr.5 popisují vztahy (4.2).

a) střídavá složka (periodická, souměrný zkratový proud)

b) stejnosměrná složka (aperiodická)

c) výsledný průběh s největší možnou stejnosměrnou složkou



Obr.6 Elektricky vzdálený zkrat s největším výskytem stejnosměrné složky

Analytické výrazy popisující průběhy podle Obr.6

$$i_{st}(t) = -\sqrt{2}.I''_k.\cos\omega t \;;\; \underline{I}''_k = \frac{cU_n}{\sqrt{3}\underline{Z}} \;;\; \omega = 2.\pi.f = \frac{2.\pi}{T} \;;\; i_a(t) = \sqrt{2}.I''_k.e^{-t/T_a} \;;\; T_a = \frac{X}{\omega.R}$$

$$i_k(t) = i_{st}(t) + i_a(t) = -\sqrt{2}.I''_k.\cos\omega t + \sqrt{2}.I''_k.e^{-t/T_a} = \sqrt{2}.I''_k.(-\cos\omega t + e^{-t/T_a}) \;;\; I_{km} = K\sqrt{2}.I''_k \cong i_k(t = 0{,}01)$$

$$K \cong 1 + e^{-0{,}01/T_a} \le 2 \;;\; I_k = I''_k \;;\; I_{vyp} = I''_k \;;\; I_{a\,vyp} = \sqrt{2}.I''_k.e^{-t_{min}/T_a}$$

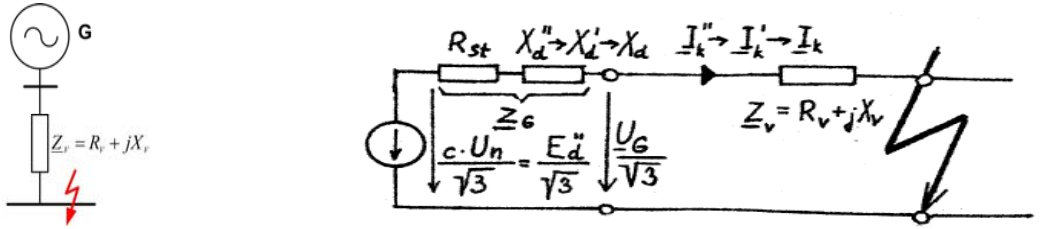
(4.2)

Poznámka: Uvedené výrazy pro I_{km} a součinitel nárazového zkratového proudu K platí při f=50 Hz. V normě [2] *a dalších materiálech podle IEC se pro součinitel nárazového zkratového proudu κ uvádí, jako dostatečně přesný pro 50 i 60 Hz, vzorec (4.3).*

$$\kappa = 1{,}02 + 0{,}98.e^{-3..R/X}$$

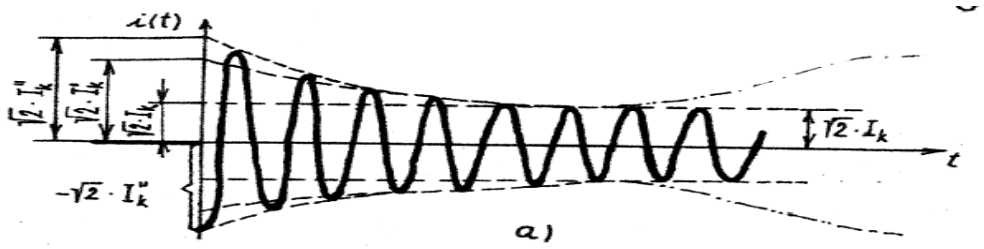
(4.3)

V případě, že **zkrat je v elektrické blízkosti synchronního stroje**, je průběh zkratového proudu složitější, protože se projeví změna elektrických parametrů stroje během zkratu, jak je naznačeno na Obr.7. Reaktance stroje se postupně mění z hodnoty rázové na přechodnou a synchronní, vztah popisující průběh zkratového proudu proto obsahuje tomu odpovídající členy a časové konstanty.



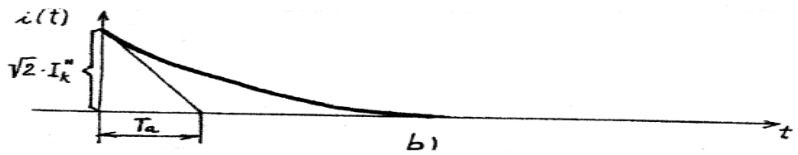
a)

střídavá složka (periodická, souměrný zkratový proud



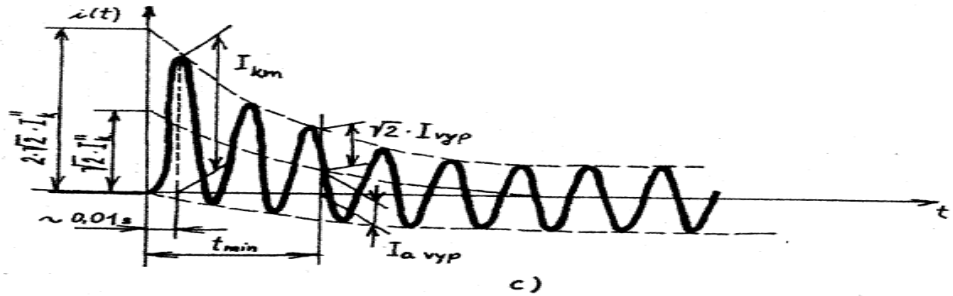
b)

stejnosměrná složka (aperiodická)



c)

výsledný průběh s největší možnou stejnosměrnou složkou



Obr.7 Zkrat elektricky blízký synchronnímu stroji

Analytické výrazy popisující průběhy podle Obr.7

$$i_{st}(t) = -\sqrt{2}.\left[\left(I''_k - I'_k\right).e^{-t/T''_d}.\cos\omega t + \left(I'_k - I_k\right).e^{-t/T'_d}.\cos\omega t + I_k.\cos\omega t\right] \;;\; \omega = 2.\pi.f = \frac{2.\pi}{T} \;;\; \underline{I}''_k = \frac{cU_n}{\sqrt{3}\underline{Z}} \;;\; \underline{Z} = \underline{Z}_G + \underline{Z}_V = \left(R_{st} + jX''_d\right) + \left(R_V + jX_V\right) \;;$$

$$\underline{I}'_k = \frac{cU_n}{\sqrt{3}\left(R_{st} + jX'_d + \underline{Z}_V\right)} \;;\; \underline{I}_k = \frac{cU_n}{\sqrt{3}\left(R_{st} + jX_d + \underline{Z}_V\right)} \;;\; i_a(t) = \sqrt{2}.I''_k.e^{-t/T_a} \;;\; T_a = \frac{X''_d + X_V}{\omega.\left(R_{st} + R_V\right)} \;;$$

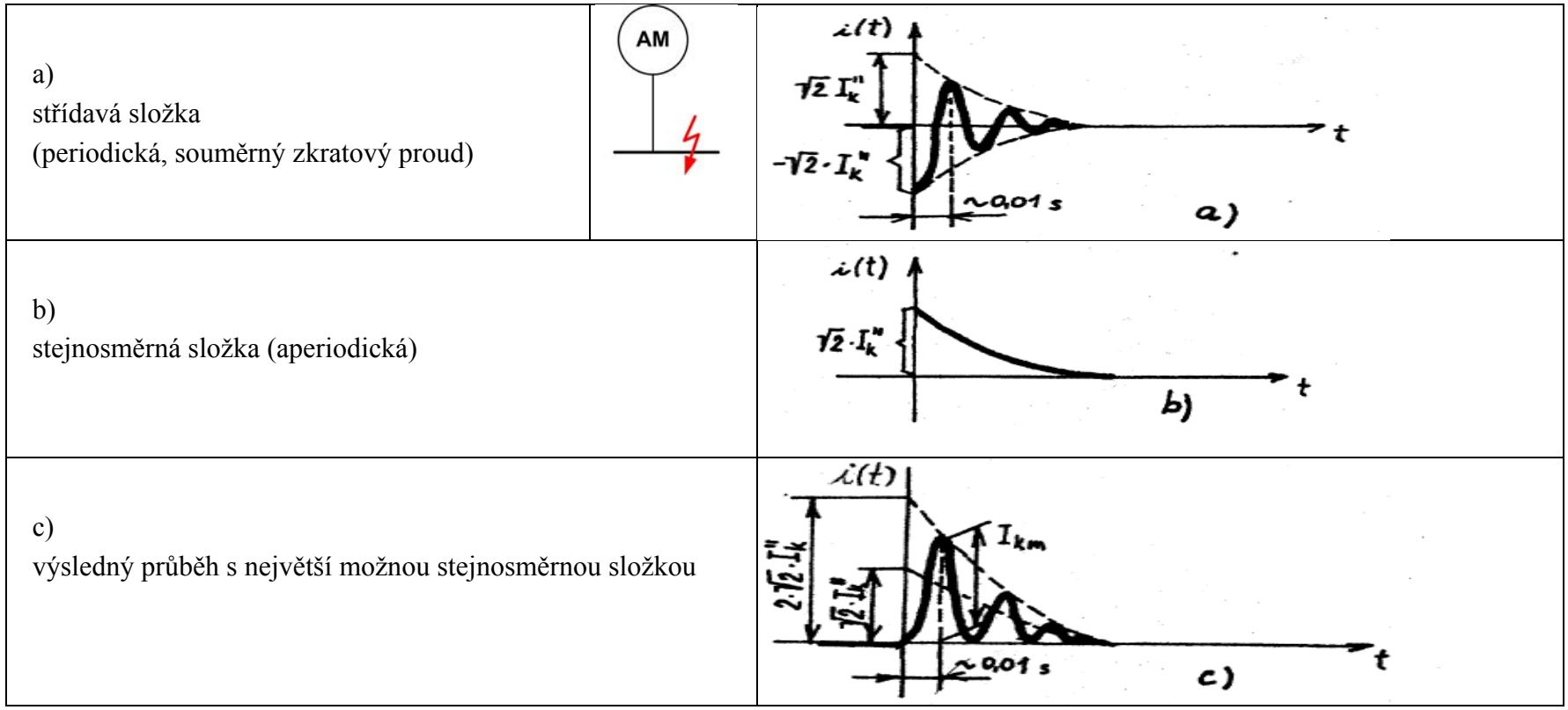
$$i_k(t) = i_{st}(t) + i_a(t) = -\sqrt{2}.\left[\left(I''_k - I'_k\right).e^{-t/T''_d}.\cos\omega t + \left(I'_k - I_k\right).e^{-t/T'_d}.\cos\omega t + I_k.\cos\omega t - I''_k.e^{-t/T_a}\right]$$

$$I_{km} = K\sqrt{2}.I''_k \cong i_k(t = 0{,}01) \;;\; I_{vyp} = \mu.I''_k \;,\; \mu = f\left(I''_{kG}/I_{nG}; t_{min}\right) \;;\; I_{a\,vyp} = \sqrt{2}.I''_k.e^{-t_{min}/T_a} \qquad \textbf{(4.4)}$$

Poznámka: Při výpočtu podle IEC se vzorec(4.3) používá pro výpočet součinitele nárazového zkratového proudu i při elektricky blízkém zkratu s tím, že se místo skutečných střídavých rezistancí strojů R_{st} použijí podstatně větší fiktivní rezistance R_{Gf}, kterými se respektuje též zanikání střídavé složky v průběhu první půlperiody zkratového proudu. Norma [2] *udává standardní poměry R_{Gf}/X''_d pro 3 kategorie generátorů.*

Průběh střídavé složky zkratového proudu při delším trvání zkratu může též být ovlivněn vzrůstem budícího proudu. Tento jev, stejně jako odlišný průběh zkratového proudu při zkratu v blízkosti synchronního stroje s vyniklými póly, výrazy (4.4) nezachycují.

Normy pro výpočet zkratů požadují respektovat při výpočtu maximálních zkratů **zkratové příspěvky asynchronních motorů**, pokud jejich vliv není zanedbatelný. Na Obr. 8 **je ideální průběh** zkratového proudu od asynchronního motoru při zkratu na jeho svorkách, **s největší možnou stejnosměrnou složkou** a za předpokladu, že časová konstanta zániku **střídavé složky zkratového proudu při zkratu na svorkách** T'_{kM} **má stejnou velikost jako časová konstanta zániku stejnosměrné složky** T_a**.** Zkratová impedance motoru Z_M odpovídá jeho záběrovému proudu I_Z při rozběhu. Při zkratu zanikají stejnosměrná i střídavá složka zkratového proudu. V okamžiku těsně před zkratem má zatížený motor vnitřní napětí nižší než je napětí na svorkách, proto lze uvažovat c<1.



Obr.8 Zkrat na svorkách asynchronního motoru

Analytické výrazy popisující průběhy podle Obr.8

$$\underline{I}''_{\mathrm{k}} = \frac{\mathrm{c}U_{\mathrm{n}}}{\sqrt{3}\underline{Z}_{\mathrm{M}}} \quad ; \quad c<1 \quad ; \quad \left|\underline{Z}_M\right| = \frac{U_{\mathrm{nM}}}{\sqrt{3}.I_{\mathrm{Z}}} = \left|\mathrm{R}_{\mathrm{M}} + jX_{\mathrm{M}}\right| \quad ; \quad \omega = 2.\pi.f = \frac{2.\pi}{\mathrm{T}}$$

$$i_{\mathrm{st}}(\mathrm{t}) = -\sqrt{2}.I''_{k.}.e^{-t/T'_{kM}}.cos\omega t \quad ; \quad i_{\mathrm{a}}(\mathrm{t}) = \sqrt{2}.I''_{\mathrm{k}}.e^{-t/\mathrm{T_a}} \quad ; \quad \mathrm{T}'_{\mathrm{kM}} \cong \mathrm{T_a} = \frac{X_{\mathrm{M}}}{\omega.R_{\mathrm{M}}} \qquad \textbf{(4.5)}$$

$$i_{\mathrm{k}}(\mathrm{t}) = i_{\mathrm{st}}(\mathrm{t}) + i_{\mathrm{a}}(\mathrm{t}) = -\sqrt{2}.I''_{\mathrm{k}}.\left(e^{-t/T'_{\mathrm{kM}}}.cos\omega t - e^{-t/\mathrm{T_a}}\right) \cong -\sqrt{2}.I''_{\mathrm{k}}.e^{-t/T_{\mathrm{a}}}.\left(cos\omega t - 1\right)$$

$$I_{\mathrm{km}} = K\sqrt{2}.I''_{\mathrm{k}} \cong i_k(\mathrm{t}=0{,}01) \quad ; \quad I_{\mathrm{vyp}} = I''_{\mathrm{k}}.e^{-t_{min}/T'_{kM}} \quad ; \quad I_{\mathrm{a\,vyp}} = \sqrt{2}.I''_{\mathrm{k}}.e^{-t_{\mathrm{min}}/\mathrm{T_a}} = \sqrt{2}.I_{\mathrm{vyp}} \quad ; \quad I_{\mathrm{k}} = 0$$

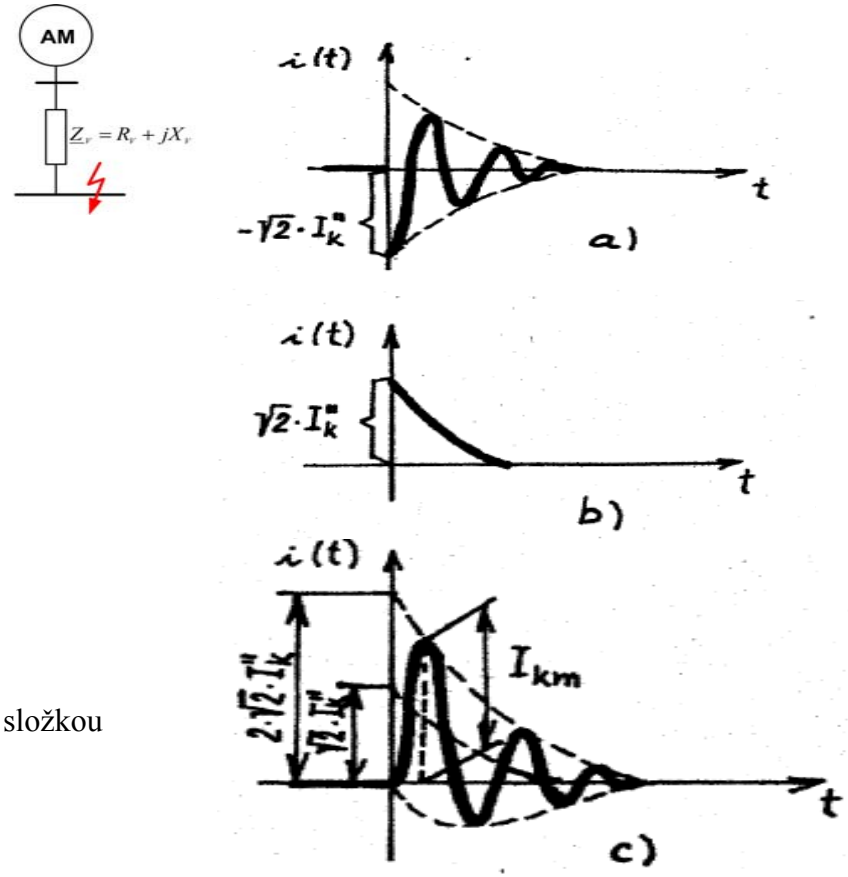
Poznámka: Podle IEC se bere součinitel c jednotný, impedance motoru se nekoriguje. Norma [2] *udává standardní poměry* R_M/X_M *pro 3 kategorie asynchronních motorů. Souměrný vypínací proud se určuje obdobně jako v případě synchronního stroje pomocí součinitele* μ *, s dodatečnou korekcí součinitelem q:* $I_{\mathrm{b3M}} = \mu.q.I''_{\mathrm{k}}$, přičemž $\mu = f\left(I''_{\mathrm{kM}}/I_{\mathrm{nM}};t_{\mathrm{min}}\right)$ a $q = f\left(P_{\mathrm{rM}}/p;t_{\mathrm{min}}\right)$, $q \leq 1$, *kde p je počet pólových dvojic asynchronního motoru.*

V případě zkratového příspěvku asynchronního motoru při zkratu za vnějším impedancí Z_V podle Obr.9 se předpokládá, že impedance vložená mezi motor a místo zkratu ovlivní časovou konstantu stejnosměrné složky, ale nikoliv velikost časové konstanty zániku střídavé složky zkratového proudu.

a)
střídavá složka
(periodická, souměrný zkratový proud)

b)
stejnosměrná složka (aperiodická)

c)
výsledný průběh s největší možnou stejnosměrnou složkou



Obr.9 Zkratový příspěvek asynchronního motoru při zkratu za vnější impedancí Z_V

Analytické výrazy popisující průběhy podle Obr.9

$$\underline{I}''_{\mathrm{k}} = \frac{\mathrm{c}U_{\mathrm{n}}}{\sqrt{3}\left(\underline{Z}_{\mathrm{M}} + \underline{Z}_{\mathrm{V}}\right)} \quad ; \quad c < 1 \quad ; \quad \left|\underline{Z}_M\right| = \frac{U_{\mathrm{nM}}}{\sqrt{3}.I_{\mathrm{Z}}} = \left|\mathrm{R}_{\mathrm{M}} + jX_{\mathrm{M}}\right| \quad ; \quad \omega = 2.\pi.f = \frac{2.\pi}{\mathrm{T}}$$

$$i_{\mathrm{st}}(\mathrm{t}) = -\sqrt{2}.I''_{k.}.e^{-t/T'_{kM}}.cos\omega t \quad ; \quad \mathrm{T}'_{\mathrm{kM}} = \frac{X_{\mathrm{M}}}{\omega.R_{\mathrm{M}}} \quad ; \quad i_{\mathrm{a}}(\mathrm{t}) = \sqrt{2}.I''_{\mathrm{k}}.e^{-t/\mathrm{T_a}} \quad ; \quad \mathrm{T_a} = \frac{X_{\mathrm{M}} + X_{\mathrm{V}}}{\omega.\left(R_{\mathrm{M}} + R_{\mathrm{V}}\right)}$$

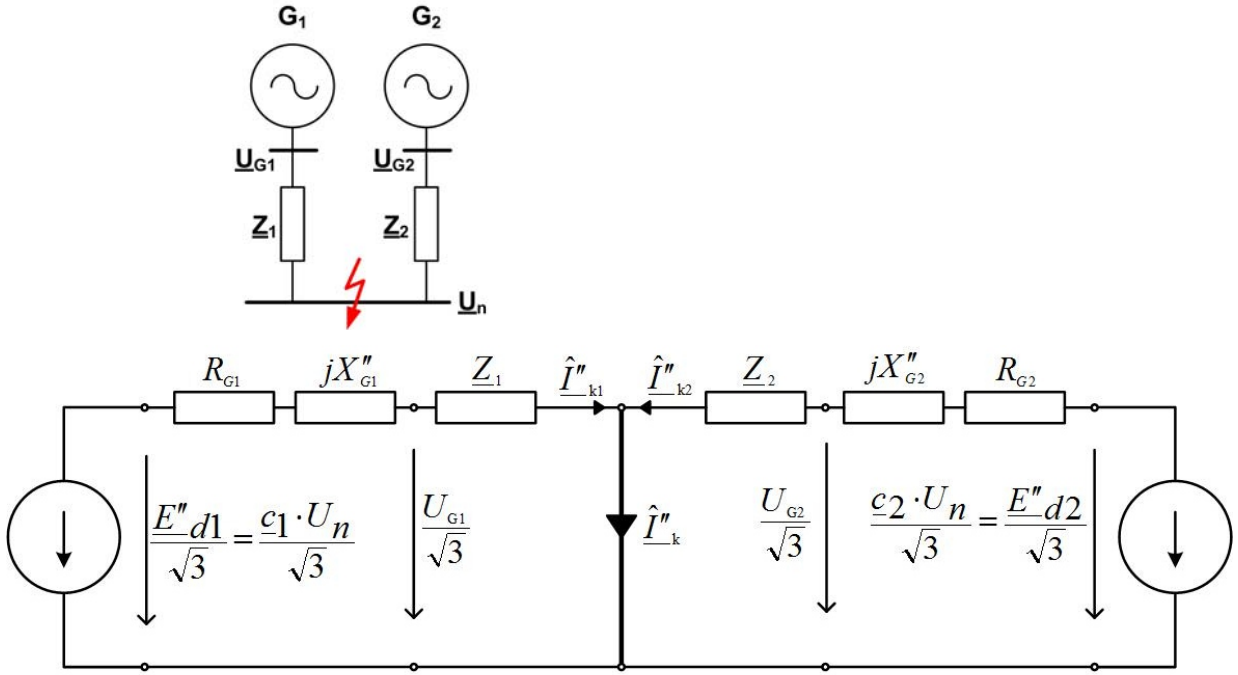
$$i_{\mathrm{k}}(\mathrm{t}) = i_{\mathrm{st}}(\mathrm{t}) + i_{\mathrm{a}}(\mathrm{t}) = -\sqrt{2}.I''_{\mathrm{k}}.\left(e^{-t/T'_{\mathrm{kM}}}.cos\omega t - e^{-t/\mathrm{T_a}}\right)$$

$$I_{\mathrm{km}} = K\sqrt{2}.I''_{\mathrm{k}} \cong i_k(\mathrm{t} = 0{,}01) \quad ; \quad I_{\mathrm{vyp}} = I''_{\mathrm{k}}.e^{-t_{min}/T'_{kM}} \quad ; \quad I_{\mathrm{a\,vyp}} = \sqrt{2}.I''_{\mathrm{k}}.e^{-t_{\mathrm{min}}/\mathrm{T_a}} \quad ; \quad I_{\mathrm{k}} = 0$$

(4.6)

Poznámka: Pro odlišný postup podle IEC platí poznámka za výrazy (4.5).

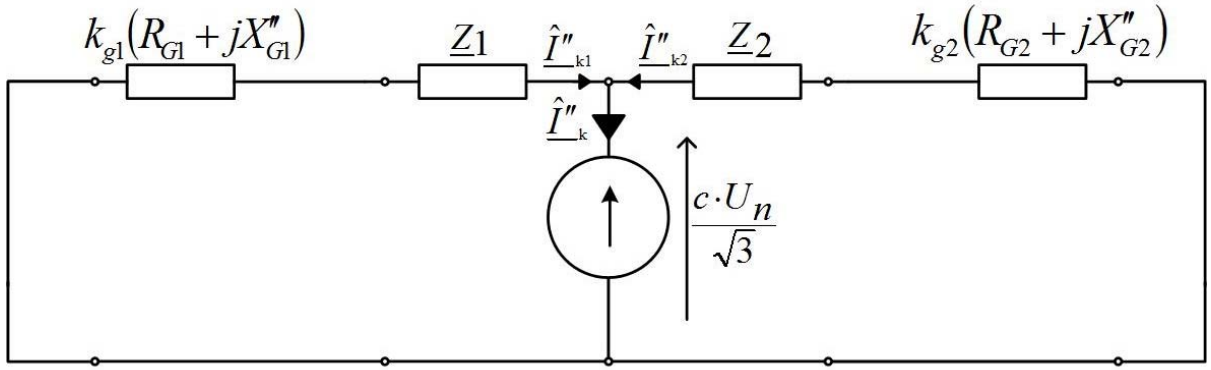
Na Obr. 10 a Obr.11 je na příkladu dvou generátorů připojených radiálně do místa zkratu vyznačeno **slučování jejich zkratových příspěvků**. Pro stejné zapojení je pak na Obr.11 ve zjednodušené formě naznačen **princip metody jediného zdroje napětí v místě zkratu,** na které je založen výpočet zkratů podle norem u nás v současnosti platných.



Obr.10 Slučování dílčích zkratových příspěvků zdrojů připojených radiálně do místa zkratu

Pro každý ze zdrojů lze určit jeho zkratový příspěvek samostatně. Odchylka vnitřního napětí zdrojů od jmenovitého napětí je respektována napěťovými součiniteli c_1 a c_2.

$$\underline{I}''_k = \underline{I}''_{k1} + \underline{I}''_{k2} \quad ; \quad \underline{I}''_{k1} = \frac{c_1 U_n}{\sqrt{3}\left(R_{G1} + jX''_{G1} + \underline{Z}_1\right)} \quad ; \quad \underline{I}''_{k2} = \frac{c_2 U_n}{\sqrt{3}\left(R_{G2} + jX''_{G2} + \underline{Z}_2\right)} \qquad \textbf{(4.7)}$$



Obr.11 Princip metody ekvivalentního zdroje v místě zkratu pro schéma jako na Obr.10

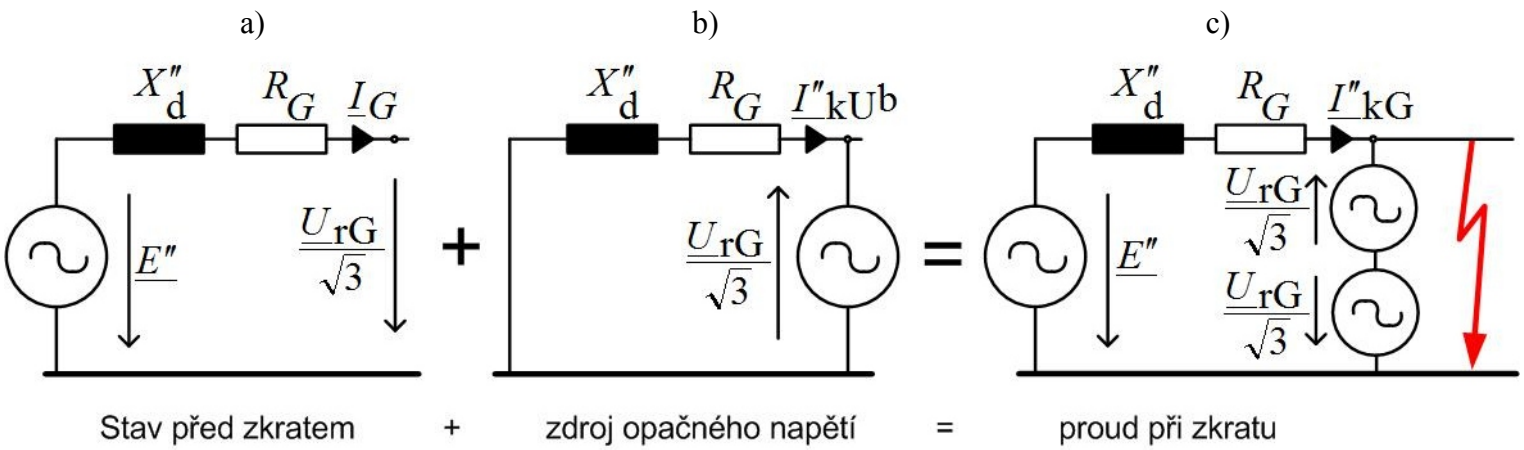
Jediným zdrojem napětí je ekvivalentní zdroj, umístěný v místě zkratu. Vnitřní napětí zdrojů zkratového proudu jsou nahrazena zkraty. Vnitřní impedance generátorů jsou korigovány korekčními součiniteli K_{G1} a K_{G2}.

$$\underline{I}''_k = \underline{I}''_{k1} + \underline{I}''_{k2} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}\underline{Z}_{výp}}$$

$$\underline{I}''_{k1} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}.(K_{G1}R_{G1} + jK_{G1}X''_{G1} + \underline{Z}_1)} \quad ; \quad \underline{I}''_{k2} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}.(K_{G2}R_{G2} + jK_{G2}X''_{G2} + \underline{Z}_2)} \qquad \textbf{(4.8)}$$

$$\frac{1}{\underline{Z}_{výp}} = \frac{1}{(K_{G1}R_{G1} + jK_{G1}X''_{G1} + \underline{Z}_1)} + \frac{1}{(K_{G2}R_{G2} + jK_{G2}X''_{G2} + \underline{Z}_2)}$$

Vztahy pro stanovení korekčních součinitelů pro výpočet zkratových proudů podle metodiky IEC jsou odvozeny v materiálu [3] . Příkladem použití metody superpozice může být stanovení korekčního součinitele K_G postupem podle Obr.12.



a) stav před zkratem, na svorkách generátoru je regulované napětí $U_G=U_{rG}$

b) zavedeno napětí jako před zkratem, v opačném smyslu

c) superpozice obvodů a) a b) pro určení zkratového příspěvku $\underline{I}''_{kG(S)}$

Obr.12 Korekční součinitel K_G a superpozice proudů podle IEC

Pro proud před zkratem $\underline{I}_G$, proud po zavedení opačného napětí v místě zkratu $\underline{I}''_{kGU^b}$, výsledný, superpozicí stanovený, zkratový proud $\underline{I}''_{kG(S)}$ a vnitřní napětí generátoru $\underline{E}''$ platí (4.9):

$$\underline{I}_G = \frac{\underline{E}'' - \underline{U}_{rG}/\sqrt{3}}{(R_G + jX''_d)} \quad ; \quad \underline{I}''_{kGU^b} = \frac{\underline{U}_{rG}/\sqrt{3}}{(R_G + jX''_d)} \quad \underline{I}''_{kG(S)} = \underline{I}_G + \underline{I}''_{kGU^b} = \frac{\underline{E}'' - \underline{U}_{rG}/\sqrt{3}}{(R_G + jX''_d)} + \frac{\underline{U}_{rG}/\sqrt{3}}{(R_G + jX''_d)} = \frac{\underline{E}''}{(R_G + jX''_d)}$$

$$\underline{E}'' = U_{rG}/\sqrt{3} + \underline{I}_G.Z_G = U_{rG}/\sqrt{3} + \underline{I}_G.(\cos\varphi_G - j\sin\varphi_G).(R_G + jX''_d) \qquad \textbf{(4.9)}$$

Použijeme-li pro výpočet výsledného zkratového proudu ekvivalentní zdroj napětí v místě zkratu $cU_{nG}/\sqrt{3}$, dostaneme vztah (4.10):

$$\underline{I}''_{kG} = \frac{cU_n/\sqrt{3}}{(R_G + jX''_d)K_G} = \underline{I}''_{kG(S)} = \frac{\underline{E}''}{(R_G + jX''_d)} \qquad (4.10)$$

Ze vztahu (4.10) a výrazu pro $\underline{E}''$ ve (4.9) lze stanovit vzorce pro korekční součinitel impedance generátoru K_G, jak jsou uvedeny ve (4.11):

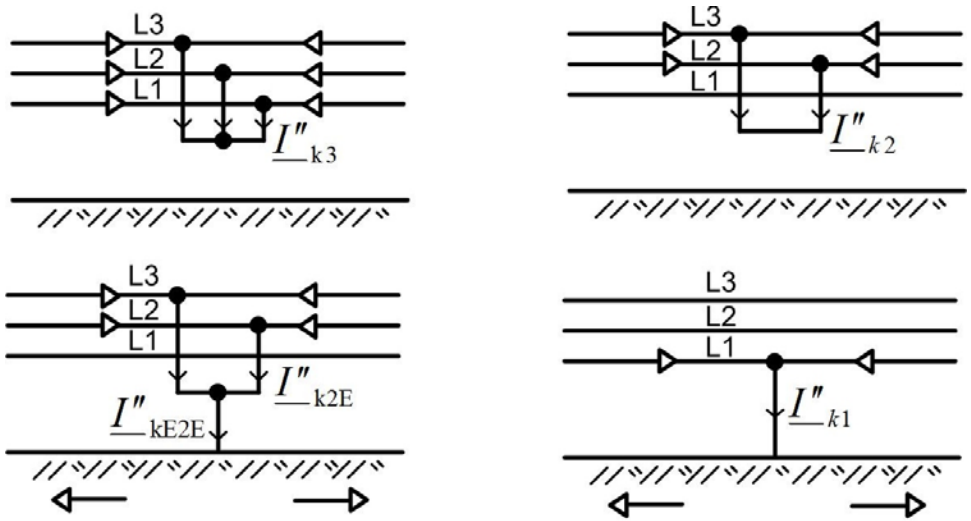
$$K_G = \frac{U_n}{U_{rG}} \cdot \frac{c}{1 + \frac{\sqrt{3}I_G}{U_{rG}}(R_G.cos\varphi_G + X''_d.sin\varphi_G) + j\frac{\sqrt{3}I_G}{U_{rG}}(X''_d.cos\varphi_G + R_G.sin\varphi_G)}$$

Pro ($R_G << X''_d$) platí přiblížení: $K_G \cong \frac{U_n}{U_{rG}} \cdot \frac{c}{1 + (I_G/I_{rG})x''_d\, sin\varphi_G}$ **(4.11)**

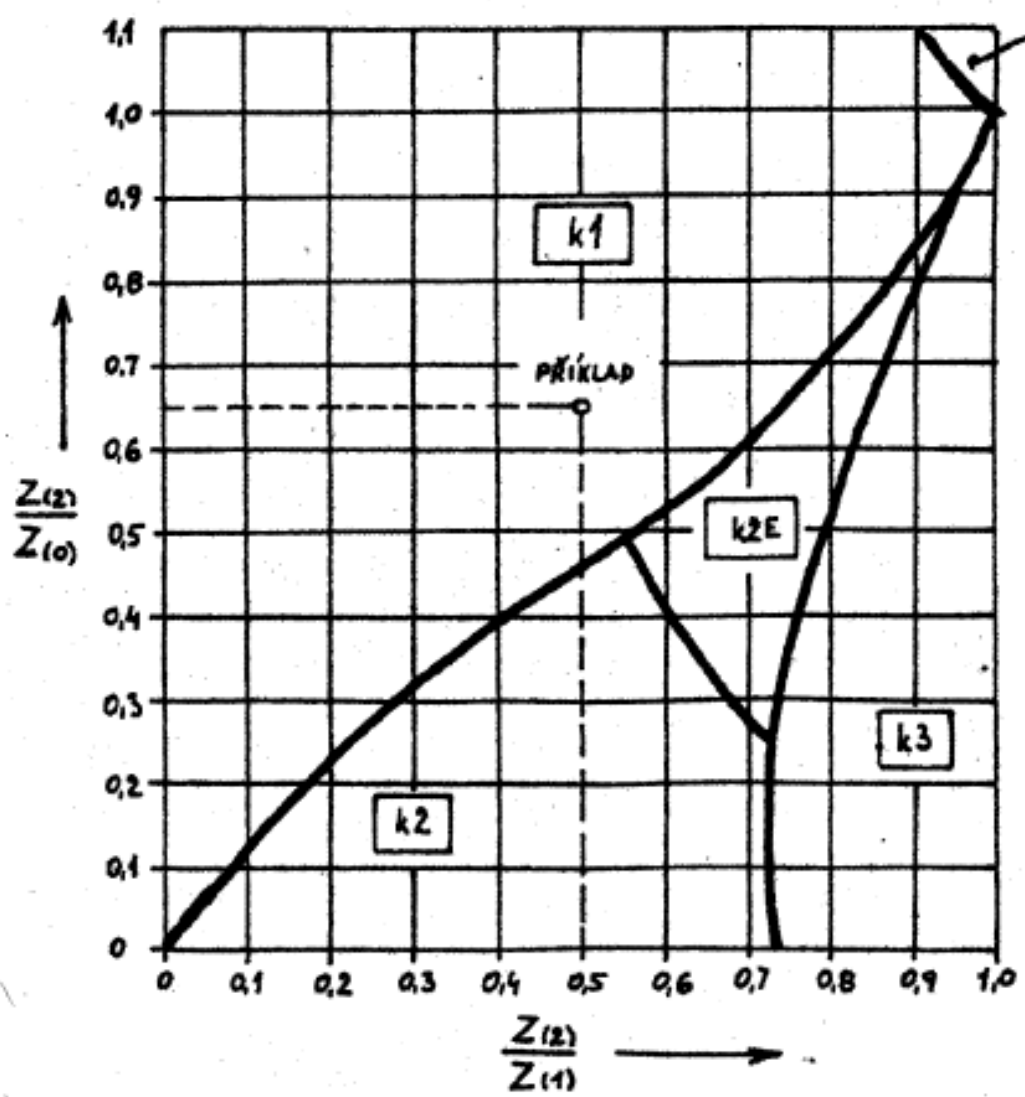
(Je zavedena poměrná hodnota rázové reaktance generátoru $x''_d = X''_d / Z_{rG}$, kde $Z_{rG} = U_{rG}^2 / S_{rG}$.)

Pro zkrat na generátoru jmenovitě zatíženém dostáváme: $K_G \cong \frac{U_n}{U_{rG}} \cdot \frac{c}{1 + x''_d\, sin\varphi_G}$

Základní druhy zkratů jsou na Obr. 13. Pro tyto druhy zkratů je v normě [2] zařazen přibližný diagram (původně prezentovaný pouze pro poměry X_2/X_1 a X_2/X_0), schématicky naznačený na Obr.14, podle **kterého lze odhadnout, při jakém druhu zkratu můžeme očekávat největší zkratový proud.** V oblasti označené kE2E, ve které je největším zkratovým proudem proud tekoucí do země při dvojitém zemním zkratu, je též zkratový proud při jednofázovém zkratu větší než při zkratu trojfázovém.



Obr.13 Základní druhy zkratů



$$\frac{R_{(1)}}{X_{(1)}} \doteq \frac{R_{(2)}}{X_{(2)}} \doteq \frac{R_{(0)}}{X_{(0)}}$$

Obr.14 Zkrat dávající největší zkratový proud

Určení ekvivalentního oteplovacího proudu

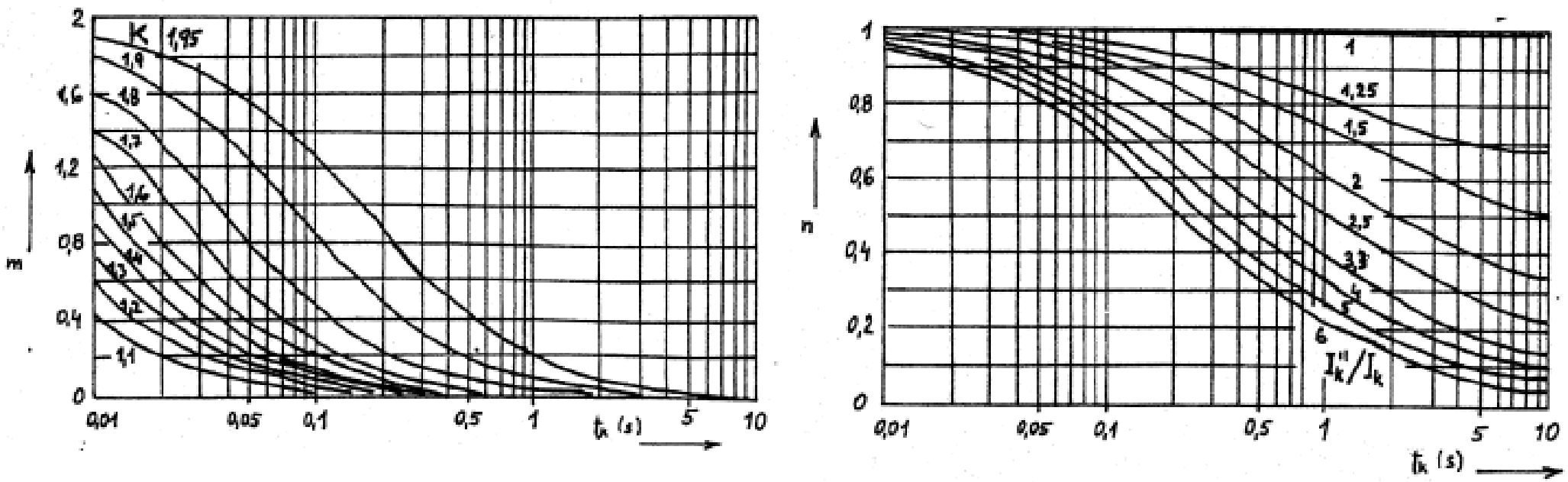
Ekvivalentní oteplovací proud I_{ke} pro dobu trváni zkratu t_k lze určit z průběhu zkratového proudu na základě jeho definice (4.12), výpočtem Jouleova integrálu:

$$I_{ke}^{2}.t_k = \int_0^{t_k} i_k^{2}(t)dt \qquad (4.12)$$

V praktických aplikacích se počítá pro maximální zkratový proud s největším možným vývinem stejnosměrné složky podle vztahů (4.13).

$$I_{ke} = I''_{\mathrm{k}}.k_e = \sqrt{\frac{\int_0^{t_k} i_k^{2}(t)dt}{t_k}} = I''_{\mathrm{k}}.\sqrt{m+n} \qquad (4.13)$$

Dřívější normy udávaly pro různá místa a doby trvání zkratu součinitele k_e. Norma [2] převzala postup z dřívější normy IEC 865, vycházející z metody, kterou zveřejnil v roce 1949 R. Roeper. Ve výpočtu Jouleova integrálu se zanedbávají periodické složky s frekvencí f=50 a 100 Hz (f=60 a 120 Hz), které mají na výsledek pro reálné doby trvání zkratu t_k malý vliv. Ekvivalentní oteplovací proud I_{ke} se pak určuje pro danou dobu trvání zkratu pomocí součinitelů *m* a *n* odečtených z grafů nebo spočítaných podle v normě uvedených výrazů, odvozených pro typový generátor s parametry uvedenými v [3] . Součinitel *m* který charakterizuje účinky stejnosměrné složky zkratového proudu, je udán v závislosti na době t_k a součiniteli nárazového zkratového proudu K, součinitel *n* charakterizující účinky střídavé složky zkratového proudu je udán v závislosti na době t_k a poměru počátečního rázového a ustáleného zkratového proudu I''_k / I_k. Pro ilustraci jsou naznačeny původní diagramy podle IEC 865 na Obr. 15. V normě [2] jsou diagramy a vzorce aktualizované, součinitel *m* je vyjádřen v závislosti na součinu $f.T_k$ a součiniteli nárazového zkratového proudu κ (norma platí pro frekvenci 50 i 60 Hz).



Obr.15 Určování hodnot *m* a *n* pro stanovení I_{ke} z diagramů pro typový generátor

Výpočet zkratových proudů podle platných norem

V současnosti platné české normy pro výpočet zkratových proudů jsou založeny na materiálech IEC, které jsou, z velké části, po schválení Evropským výborem pro normalizaci v elektrotechnice (CENELEC) přebírány do soustavy evropských norem a po přeložení jsou vydávány – s větším či menším časovým odstupem – jako standard ČSN nebo podniková norma energetiky (PNE). Soubor norem týkajících se zkratových výpočtů je značně rozsáhlý, standardy a technické zprávy jsou těsně provázány, obsahují velké množství definic, vzorců a diagramů, pravidel, možných odchylek, jednoduchých i složitějších příkladů a odvolání na související materiály.

Obtížně řešitelné situace nastávají v okamžiku, kdy elektrické zařízení vybudované v minulosti, navržené podle tehdy platných norem a doposud úspěšně provozované, se ukáže, po provedení kontrolního výpočtu podle dnešních standardů, jako nevyhovující.

Charakteristiky relevantních platných norem

ČSN EN 60909-0:2002 (33 3022) Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách - Část 0: **Výpočet proudů**.

Norma [2] je identická s IEC 60909-0:2001. V českém vydání normy jsou formou poznámek zahrnuty opravy IEC 60909-0:2001/Cor.1:2002-02. Je to **základní norma pro výpočet zkratových proudů**, další platné standardy a technické zprávy tuto normu doplňují, rozšiřují a odůvodňují. Oproti dřívějším standardům, které měly základ v IEC 909 z roku 1988, je norma odlišně uspořádána, výpočet elektricky blízkých a elektricky vzdálených zkratů není rozdělen do samostatných oddílů. Byly změněny doporučované hodnoty napěťových součinitelů a upraveny některé základní definice. Výpočet zkratů v blízkosti generátorů s blokovými transformátory byl upřesněn, doplněny byly výrazy pro elektrárenský blok s transformátorem bez regulace pod zatížením. Je požadováno použití korigované impedance i pro síťové transformátory. Byl doplněn postup výpočtu zkratových proudů při zkratu na straně nn síťového transformátoru v zapojení Dyn při přerušení jednoho napájecího vodiče na straně vn a z norem zabývajících se dimenzováním s ohledem na účinky zkratových proudů byl do normy [2] včleněn postup pro výpočet Jouleova integrálu a ekvivalentního oteplovacího proudu. Touto normou byly k 1.7.2004 zrušeny ČSN 33 3020 ze září 1992 a ČSN 33 3022 z listopadu 1996.

ČSN 33 3022-1:2004 Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách - Část 1: **Součinitele pro výpočet zkratových proudů podle IEC 60909-0**

Norma [3] je identická s technickou zprávou IEC TR 60909-1:2002 a nahradila ČSN IEC 909-1 (33 3023) z května 1997, která byla překladem IEC 909-1:1991. V této technické zprávě je odůvodněno použití metody ekvivalentního napěťového zdroje v místě zkratu a vysvětlen význam napěťového součinitele c. Zdůvodněno je použití korekčních součinitelů nejen pro zkratové impedance generátorů, blokových transformátorů a elektrárenských bloků, ale nově i pro impedance síťových transformátorů (součinitele K_G, K_S, K_{SO}, $K_{G,S}$, $K_{T,S}$, $K_{G,SO}$, $K_{T,SO}$, K_T). Mimo tyto korekční součinitele jsou v této publikaci zdůvodněny a odvozeny výrazy pro další součinitele sloužící v normě [2] k určení parametrů zkratového proudu (součinitele κ, μ, λ, q, m, n). V závěru technické zprávy jsou odvozeny pomocné výrazy použitelné pro posouzení možnosti zanedbat příspěvek asynchronních motorů.

ČSN 33 3022-2:2004 Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách - Část 2: **Data pro výpočty zkratových proudů v souladu s IEC 60909**

Norma [4] byla zpracována podle technické zprávy IEC TR 60909-2 z roku 1992. Tato technická zpráva IEC však byla v roce 2008 nahrazena doplněným a upřesněným druhým vydáním [5] . Druhé vydání technické zprávy IEC nebylo zatím zařazeno do soustavy evropských norem a údajně se zatím nepřipravuje ani jeho vydání v české verzi. Je však zřejmě pouze otázkou času, kdy norma ČSN [4] , již překonaná publikací [5] , přestane platit.

IEC/TR 60909-2, Edition 2.0, 2008-11 Short-circuit currents in three-phase a.c. systems – Part 2: **Data of electrical equipment for short-circuit current calculations**

V technické zprávě [5] jsou zpracovány a vyhodnoceny parametry elektrického zařízení pro frekvenci 50 i 60 Hz, na základě údajů, poskytnutých národními výbory členských zemí IEC. Zpráva je určena jako pomůcka pro výpočty zkratových proudů podle norem [2] a [6] . Výpočty zkratů by měly být přednostně založeny na údajích poskytnutých výrobcem zařízení. Typická data elektrického zařízení zpracovaná IEC lze použít pro porovnání nebo pro odhad v případě, že přesnější údaje nejsou dostupné. V technické zprávě jsou soustředěna data synchronních strojů (generátorů, motorů a kompensátorů), transformátorů

(dvouvinuťových, trojvinuťových, blokových, síťových i autotransformátorů), vrchních vedení (jednoduchých a se dvěma potahy), kabelů různých typů a uspořádání a tuhých přípojnicových vedení.

Technická zpráva IEC [5] nebyla zatím zařazena do soustavy evropských norem a nemá český ekvivalent.

ČSN EN 60909-3 (33 3022):2010: ed. 2, Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách – Část 3: **Proudy během dvou nesoumístných současných jednofázových zkratů a příspěvky zkratových proudů tekoucích zemí**

Norma [6] je identická s normou IEC 60909-3:2009 a nahrazuje první vydání ČSN EN 60909-3 z roku 2004, které však do 1.března 2013 platí souběžně s vydáním druhým. Tato norma, s poněkud krkolomným a nepříliš přesným názvem, se podrobně (včetně řešených příkladů) zabývá dvěma specifickými případy, které dostatečně nepokrývá základní norma [2] :

a) proudy při dvou současných (simultánních) zemních spojeních v různých místech a v různých fázích soustavy s neúčinně uzemněným uzlem (střední uzly zdrojů jsou izolovány nebo uzemněny přes rezonanční tlumivku – soustavy IT)

b) dílčími zkratovými proudy tekoucími zemí (včetně jejich rozložení) při jednofázovém zkratu v soustavě s účinně uzemněným uzlem (střední uzly zdrojů jsou uzemněny přímo nebo přes malou impedanci)

Stanovení těchto poruchových proudů je důležité pro určení indukovaných napětí nebo dotykových a krokových napětí a zvýšeného potenciálu země v elektrárnách a elektrických stanicích a u stožárů venkovních vedení. Norma se také zabývá výpočtem redukčních faktorů venkovních vedení a kabelů.

IEC/TR 60909-4: First edition: 2000-07, Technical report. Short-circuit currents in three-phase a.c. systems – Part 4: **Examples for the calculation of short-circuit currents**

Technická zpráva IEC [7] byla začleněna do soustavy našich norem jako PNE 33 3042:2001 „Příklady výpočtu zkratových proudů ve střídavých sítích“. Obsahuje, mimo příklady výpočtů, též některé doplňující informace k základní normě [2] . V kapitole 2 jsou například vztahy související s interpretací a měřením sousledných, zpětných a netočivých impedancí venkovních vedení, transformátorů, generátorů a elektrárenských bloků. Také je v ní poměrně obsáhlý přehled náhradních schémat transformátorů v sousledné a netočivé složkové soustavě a směrné hodnoty pro určení netočivé reaktance transformátorů podle jejich konstrukce a zapojení.

Pro jednoduchý případ zkratu na nn vývodu 400 V napájeném ze dvou paralelních transformátorů jsou z technických parametrů zařízení stanoveny sousledné a zpětné impedance síťového napáječe vn, síťových transformátorů a kabelových i venkovního vedení, sestavena náhradní schémata složkových soustav. Pro různá místa zkratu jsou počítány a diskutovány hodnoty počátečního rázového zkratového proudu a nárazového zkratového proudu – ten je určen třemi možnými postupy podle normy [2] . Také je určen Jouleův integrál při vypínaní jednotlivých zkratů jističem nebo pojistkou.

Příklad v kapitole 4 se zabývá jednoduchou soustavou s transformací 33/6 kV, zahrnující i asynchronní motory 6 kV. Výpočet trojfázového zkratu je proveden různými způsoby, s komplexními hodnotami impedancí, nebo s reaktancemi (metodou ekvivalentního zdroje), s absolutními hodnotami i s hodnotami procentními a také je doložen, pro porovnání, výpočet metodou superpozice. Další příklad v kapitole 5 dokumentuje výpočet trojfázových zkratových proudů ve vývodu elektrárenského bloku a v rozvodu vlastní spotřeby elektrárny s motory vn a skupinami motorů nn.

V kapitole 6 je zadáni zkušebního příkladu pro výpočet zkratů výpočetními programy. V tabulce 12 a 13 jsou výsledky výpočtu pro maximální trojfázový a jednofázový zkrat v definovaných místech zkratu. Výsledky výpočtu provedené zkoušeným programem by se neměly od uvedených výsledků lišit o více než ±0,02 %. Je to podmínka nutná, nikoliv však postačující, k prokázání, že výpočetní program splňuje požadavky standardu[2] .

ČSN EN 60865-1 (33 3040):1997, Zkratové proudy – Výpočet účinků – Část1: **Definice a výpočetní metody**

Norma [8] [6] je identická s normou IEC 865-1:1993. V roce 2007 byla k této ČSN vydána ČSN EN 60865-1, OPRAVA 1, identická s opravou IEC 865-1:1993/Cor.:1995-03. Technická skupina IEC TC 73 však v únoru 2010 zveřejnila konečný návrh pro hlasování normy IEC 60865-1, Ed.3.0, který byl v roce 2011 schválen. V současné době se připravuje k tisku překlad, jako ČSN EN 60865-1, druhé vydání.

Normu je možné použít ke stanovení silových a tepelných účinků střídavých zkratových proudů, stanovených podle IEC 60909. Obsahuje postupy pro výpočet elektromagnetického účinku na tuhé a ohebné vodiče a tepelného účinku na holé vodiče.

IEC/TR 60865-2:1994-07, Technical report. Short-circuit currents – Calculation of effects, Part 2: **Examples of calculations**

Tato technická zpráva IEC byla začleněna do soustavy našich norem jako PNE 33 3041:1997 „Zkratové proudy - Výpočet účinků – Část 2: Příklady výpočtů“ .

ČSN EN 61660-1 (33 3025):1999, Zkratové proudy **ve stejnosměrných rozvodech vlastní spotřeby v elektrárnách a rozvodnách** – Část 1: **Výpočet zkratových proudů.** (idt EN 61660-1:1997, idt IEC 61660-1:1997)

ČSN EN 61660-2 (33 3026):1999, Zkratové proudy ve stejnosměrných rozvodech vlastní spotřeby v elektrárnách a rozvodnách – Část 2: **Výpočet účinků**. (idt EN 61660-2:1997, idt IEC 61660-2:1997)

ČSN IEC 61660-3 (33 3025):2002, Zkratové proudy ve stejnosměrných rozvodech vlastní spotřeby v elektrárnách a rozvodnách – Část 3: **Příklady výpočtů.** (idt IEC TR 61660-3:2000)

Soubor těchto tří norem je zpracován podle publikací IEC, přičemž IEC TR 61660-3 má statut Technické zprávy. Specifické použití těchto norem je zřejmé z jejich názvu.

Výpočet zkratových proudů podle ČSN EN 60909-0:2002

K použití normy

Výpočet zkratových proudů je nutné, v převážné většině případů, provádět **s komplexními hodnotami podélných zkratových impedancí jednotlivých prvků**. Při **ručním výpočtu** se určuje **výsledná zkratová impedance postupným zjednodušováním** sítě (např. sériové spojení, paralelní spojení nebo transfigurace trojúhelník-hvězda jednotlivých prvků). Ruční provádění matematických operací s komplexními čísly je poměrně náročné a základní norma pro výpočet zkratů [2] přímo doporučuje pro případ složitějších zauzlených (mřížových) sítí používat **výpočetní programy**.

Pro provádění ručních výpočtů v nepříliš složitém náhradním schématu by mělo postačit seznámení se základní normou [2] a vyhledání vhodného postupu a příslušných vzorců pro konkrétní daný případ. Předpokladem úspěšné realizace výpočtu je pak stanovení potřebných technických parametrů jednotlivých prvků pro dosazení do vzorců pro určení jejich zkratových impedancí a korekčních součinitelů**. Převodem korigovaných impedancí na napěťovou hladinu v místě zkratu se stanoví hodnota zkratových impedancí jednotlivých zkratových příspěvků, případně výsledné zkratové impedance** (sousledná, zpětná a netočivá) pro dané místo zkratu. **Z těchto zkratových impedancí lze pak určit velikost počátečního souměrného rázového zkratového proudu I_k'' jednotlivých zkratových příspěvků, případně výsledného zkratového proudu**. V normě stanovenými postupy lze pak hodnotě I_k'' přiřadit další požadované **parametry zkratového proudu**. Protože norma připouští, pro určení některých parametrů, postupy alternativní, mělo by být z výpočtu jasné, který z postupů byl použit.

Znalost definic a postupů podle základní normy [2] je vhodná i pro správné použití a interpretaci výsledků výpočetního programu, pokud je výpočet parametrů zkratového proudu prováděn podle tohoto standardu. Autor takového programu pro výpočet zkratů se patrně seznámí se souborem příslušných norem, včetně technických zpráv [3] , [5] a [7] . Bude se muset zřejmě rozhodnout, které výpočetní postupy, s ohledem na jeho předpokládané využití, do programu zahrne - jiné postupy se uplatní při výpočtech přenosových a distribučních sítí vvn a vn, jiné bude zřejmě vyžadovat program určený pro výpočet zkratových proudů ve vlastní spotřebě elektráren, velkých transformačních stanic, průmyslových provozů apod. a jiné charakteristiky by měl mít program specializovaný na kontrolu zařízení ve vývodech generátorů při elektricky blízkém zkratu. (Pro tento poslední případ vyžadují postupy podle normy zvláštní pozornost a nejsou příliš vhodné.) Pokud norma [2] připouští alternativní postupy (např. při určení součinitele κ pro výpočet nárazového zkratového proudu), nebo pro výpočet některých parametrů vyžaduje zavedení odlišných hodnot (např. fiktivní a skutečná hodnota rezistance synchronního stroje), mělo by být z popisu jasné, jaký postup byl při výpočtu nebo tvorbě programu použit. Shodnost postupů zakotvených v programu s požadavky normy [2] by měla být jasně deklarována a doložena výsledky zkušebního příkladu, který je, i s přípustnými odchylkami výsledků, uveden v technické zprávě IEC 60909-4 [7] .

Následující přehled normy [2] se snaží upozornit na:

- značení fyzikálních veličin použité ve [2] a [3]
- hlavní zásady výpočtu
- základní vztahy pro výpočet korigovaných impedancí
- výrazy pro výpočet počátečního rázového zkratového proudu I''_k pro základní druhy zkratů
- postup při stanovení parametrů zkratového proudu
- některá úskalí při praktické aplikaci této normy

Přehled provádí platnou normou a nemůže ji v žádném případě nahradit, i když obsahuje některé vzorce a vztahy z normy převzaté. Komentáře obsahující některá upozornění nebo připomínky autora k požadavkům normy, jsou vloženy přímo do textu jako *Poznámky*.

V normách použité značení

Všechny rovnice v normě jsou psány bez specifikujících jednotek. Fyzikálním veličinám, které jsou zastoupeny symbolem, lze přiřadit numerické hodnoty i rozměry volené v rámci koherentního systému, například mezinárodní soustavy jednotek SI. Komplexní číslo je označeno podtržením příslušného symbolu, např. $\underline{Z}_k$.

A	Počáteční hodnota stejnosměrné složky $i_{d.c.}$
c	Napěťový součinitel
$cU_n/\sqrt{3}$	Napětí ekvivalentního zdroje (efektivní hodnota)
E''	Rázové (subtranzitní) napětí synchronního stroje
f	Kmitočet (50 Hz nebo 60 Hz)
I_b	Souměrný zkratový vypínací proud (efektivní hodnota)
I_k	Ustálený zkratový proud (efektivní hodnota)
I''_k	Počáteční souměrný rázový zkratový proud (efektivní hodnota)
I_{LR}	Souměrný záběrový proud asynchronního motoru

I_r Jmenovitý proud elektrického zařízení
I_{th} Ekvivalentní oteplovací zkratový proud
$i_{d.c.}$ Stejnosměrná složka zkratového proudu
i_p Nárazový zkratový proud
K Korekční součinitel pro impedance
m Činitel pro tepelné účinky stejnosměrné složky
n Činitel pro tepelné účinky střídavé složky
p Počet pólových dvojic asynchronního motoru
p_G Rozsah regulace generátorového napětí
p_T Rozsah regulace napětí transformátoru
P_{krT} Jmenovité ztráty nakrátko transformátoru
P_{rM} Jmenovitý činný výkon asynchronního motoru ($P_{rM} = S_{rM} \cos \varphi_{rM}\, \eta_{rM}$)
q Součinitel pro výpočet vypínacích proudů asynchronních motorů
q_n Jmenovitý průřez
R příp. r Rezistance, absolutní příp. poměrná hodnota
R_G Rezistance synchronního stroje
R_{Gf} Fiktivní rezistance synchronního stroje při výpočtu i_p
S''_k Rázový zkratový výkon
S_r Jmenovitý zdánlivý výkon elektrického zařízení
t_{min} Minimální doba vypnutí
t_r Jmenovitý převod transformátoru (odbočkový přepínač v hlavní poloze); $t_r \geq 1$
T_K Doba trvání zkratového proudu
U_m Nejvyšší napětí zařízení, sdružené (efektivní hodnota)
U_n Jmenovité napětí soustavy, sdružené (efektivní hodnota)
U_r Jmenovité napětí zařízení, sdružené (efektivní hodnota)
u_{kr} Jmenovité napětí nakrátko transformátoru v procentech
u_{kR} Napětí nakrátko reaktoru omezujícího zkrat v procentech
u_{Rr} Činná složka jmenovitého napětí nakrátko transformátoru v procentech
u_{Xr} Induktivní složka jmenovitého napětí nakrátko transformátoru v procentech
$U_{(1)}$, $U_{(2)}$, $U_{(0)}$ Napětí sousledné, zpětné, netočivé složkové soustavy
X příp. x Reaktance, absolutní příp. poměrná hodnota
X_d příp. X_q Synchronní reaktance podélná příp. příčná
X_{Dp} Fiktivní reaktance generátoru s kompaudním buzením v případě ustáleného zkratu na svorkách
X''_d příp. X''_q Rázová reaktance synchronního stroje (nasycená hodnota), podélná příp. příčná
x_d Nenasycená synchronní reaktance, poměrná hodnota
$x_{d\,sat}$ Nasycená synchronní reaktance, poměrná hodnota (převrácená hodnota nasyceného zkratového poměru naprázdno)
Z příp. z Impedance, absolutní příp. poměrná hodnota
Z_k Zkratová impedance trojfázové střídavé soustavy
$Z_{(1)}$ Sousledná impedance zkratového obvodu

$Z_{(2)}$	Zpětná impedance zkratového obvodu
$Z_{(0)}$	Netočivá impedance zkratového obvodu
η	Účinnost asynchronních motorů
κ	Součinitel pro výpočet nárazového zkratového proudu
λ	Součinitel pro výpočet ustáleného zkratového proudu
μ	Součinitel pro výpočet souměrného zkratového vypínacího proudu
μ_0	Absolutní permeabilita vakua, $\mu_0 = 4\pi.10^{-7}$ H/m
ρ	Rezistivita (měrný odpor)
φ	Fázový úhel
θ_e	Teplota vodiče na konci zkratu
01	Referenční bod (přípojnice) sousledné soustavy
02	Referenční bod (přípojnice) zpětné soustavy
00	Referenční bod (přípojnice) netočivé soustavy
E	Napětí za synchronní podélnou reaktancí X_d synchronního stroje
E'	Napětí za přechodnou podélnou reaktancí X'_d synchronního stroje
E''_Q	Rázové napětí za impedancí síťového napáječe připojeného v místě Q
$E_0(I_f)$	Svorkové napětí nezatíženého nasyceného synchronního stroje (I_G= 0)
I_b	Proud ve větvi (zatěžovací proud) před zkratem
I_f	Budící proud synchronního stroje
$i_k(t)$	Časově závislý zkratový proud (okamžitá hodnota zkratového proudu)
$I''_{kU}{}^b$	Počáteční symetrický zkratový proud způsobený napětím $-U^b$ při výpočtu zkratových proudů superpoziční metodou
p_G nebo p_T	Poměrné hodnoty pro definování rozsahu změny svorkových napětí, například $U_G = U_{rG}(1 \pm p_G)$ nebo $U_{THV} = U_{rTHV}(1 \pm p_T)$
T_{AC}	Střídavá časová konstanta asynchronního motoru
T''_N	Střední hodnota časových konstant T''_{dN} a T''_{qN}
$T_{\mu q}$	Časová konstanta vypočítaná součinem μq (viz 2.7.2)
t_p	Časový interval od začátku zkratu až do dosažení nárazového zkratového proudu
U^b	Napětí v místě zkratu před zkratem
X_p	Potierova reaktance
Y	Admitance
γ	Impedanční úhel
Δ	Odchylka
φ_U	Úhel napětí

Dolní indexy

(1)	Sousledná složka
(2)	Zpětná složka
(0)	Netočivá složka

a.c.	Střídavý proud
d.c.	Stejnosměrný proud
f	Fiktivní
k příp. k3	Trojfázový zkrat
k1	Jednofázový zkrat (mezi fází a zemí, mezi fází a středním vodičem)
k2	Dvoufázový zkrat izolovaný
k2E	Dvoufázový zemní zkrat (index se týká proudu ve fázích)
kE2E	Dvoufázový zemní zkrat (index se týká proudu do země)
K	Impedance nebo reaktance vypočítané s impedančním korekčním součinitelem K_T, K_G nebo K_S nebo K_{SO}
max	Maximum
min	Minimum
n	Jmenovitá hodnota (IEV 151-04-01)
r	Jmenovitá hodnota zařízení (IEV 151-04-03)
rsl	Výsledný
t	Transformovaná hodnota
AT	Transformátor vlastní spotřeby
B	Přípojnice
E	Zem
F	Místo zkratu
G	Generátor
HV	označení vinutí vyššího napětí transformátoru
LV	nn, příp. označení vinutí nižšího napětí transformátoru
L	Vedení, vodič
LR	Zabrzděný rotor
L1, L2, L3	Vodiče trojfázové střídavé soustavy
M	Asynchronní motor nebo skupina asynchronních motorů
~~M~~	Bez motoru
MV	Vysoké napětí (vn), strana vyššího napětí sokého napětí transformátoru
N	Střední vodič trojfázové střídavé soustavy, uzel vinutí (při zapojení do hvězdy) generátoru nebo transformátoru
P	Svorka, pól
Q	Bod připojení nadřazené soustavy
R	Zkrat omezující reaktor
S	Elektrárenský blok (generátor a blokový transformátor s přepínačem odboček při zatížení)
SO	Elektrárenský blok (generátor a blokový transformátor se stálým převodem nebo s přepínačem odboček bez zatížení)
T	Transformátor
0	Nezatížené (naprázdno) (T''_{d0})
d	Podélná osa
q	Příčná osa
f	Buzení synchronního stroje
IEC	Podle IEC 60909-0, například $K_{S(IEC)}$

i	Vnitřní
L	Zatížení
MAX	Maximum (zkratový proud v nejhorším případě síťových poměrů)
N	Síť

Horní indexy

´´	Počáteční rázová (zkratová) hodnota
´	Rezistance či reaktance na jednotku délky
b	Před zkratem

Hlavní zásady výpočtu

Základní norma [2] spolu se souvisejícími standardy a technickými zprávami platí pro výpočet zkratových proudů v trojfázových střídavých soustavách 50 a 60 Hz a je použitelná pro sítě s nejvyšším provozním napětím do 550 kV. **V normě je použita metoda ekvivalentního napěťového zdroje v místě zkratu, nevylučuje se však použití speciálních metod, například metody superpozice, pokud zajistí minimálně stejnou přesnost.** Výpočet je prováděn se zjednodušeními, která jsou v normě specifikována. Uvažují se impedance transformátorů pro přepínače odboček v základní poloze. V sousledné a zpětné složkové soustavě není nutné pří výpočtu zkratových proudů uvažovat paralelní admitance. Při výpočtu nesouměrných zkratových proudů v soustavách s napětím nad 1 kV izolovaných nebo neúčinně uzemněných je nutné v netočivé soustavě uvažovat kapacitu vedení a příčné admitance. V sítích nn je možné zanedbat kapacity vedení a kabelů ve složkové soustavě sousledné, zpětné i netočivé.

Hodnoty impedancí se obvykle přepočítávají na tu napěťovou hladinu, ve které se má určit zkratový proud. Impedance zařízení v sítích vyšších a nižších napětí musí být vyděleny nebo vynásobeny čtvercem jmenovitého převodu transformátoru t_r. Napětí a proudy musí být přepočteny jmenovitým převodem transformátoru t_r.

Jediným aktivním zdrojem napětí je ekvivalentní napěťový zdroj umístěný do místa zkratu, který má velikost $cU_n/\sqrt{3}$, kde c je napěťový součinitel a U_n je jmenovité napětí sítě v místě zkratu. Všechny zdroje zkratového proudu – síťové napáječe, synchronní a asynchronní stroje jsou nahrazovány svou vnitřní impedancí a jejich vnitřní napětí je uvažováno nulové.

Napěťový součinitel c

Při výpočtu maximálních zkratových proudů se použije součinitel c_{max} , který má velikost

1,05 pro zkrat v soustavách nízkého napětí (U_n je 100 V až 1000 V), které mají dovolenou toleranci napětí + 6 % (například soustavy přecházející z 380 V na 400 V)

1,10 v soustavách nn, které mají dovolenou toleranci napětí +10 % a v soustavách se jmenovitým napětím nad 1 kV

Přitom se uvažuje konfigurace soustavy a příspěvky zdrojů zkratových proudů tak, aby vedly k maximální velikosti zkratového proudu v místě zkratu, a uvažuje se vliv asynchronních motorů. Počítá se s rezistencí kabelů a vedení odpovídající teplotě 20 °C.

Poznámka: *Součin* $c_{max}U_n$ *by neměl překročit nejvyšší napětí zařízení. Pro zkrat v naší síti 400 kV, s nejvyšším napětím zařízení 420 kV, je tedy třeba brát* c_{max} = 1,05.

Při výpočtu minimálních zkratových proudů se použije součinitel c_{min} , který má velikost

0,95 pro zkrat v soustavách nízkého napětí (U_n je 100 V až 1000 V)

1,00 v soustavách se jmenovitým napětím nad 1 kV

Přitom se uvažuje konfigurace soustavy a minimální příspěvky zdrojů zkratových proudů tak, aby vedly k nejmenší hodnotě zkratového proudu v místě zkratu. Zanedbává se vliv motorů.

Rezistance vedení (vrchních vedení, kabelů a středních vodičů) se má brát při zvýšené teplotě:

$$R_L = [\,1 + \alpha\,(\,\theta_e - 20\ °C)].R_{L20} \qquad \textbf{(5.1)}$$

R_{L20} je rezistance při teplotě 20 °C;
θ_e teplota vodiče ve stupních Celsia na konci zkratu (viz například IEC 60865-1, IEC 90949 a IEC 60986)
α součinitel rovný 0,004/K, platný s dostatečnou přesností pro praktické účely pro měď, hliník a slitinu hliníku.

Poznámka: *Za předpokladu adiabatického ohřevu vodiče je jeho skutečná teplota na konci zkratu* θ_e *dána teplotou vodiče před zkratem* θ_b *(ta závisí na provozním zatížen, materiálových konstantách, konstrukci a uložení vedení, teplotě okolí apod.), velikosti ekvivalentního zkratového proudu a době trvání zkratu. Striktní uplatnění požadavku na použití teploty* θ_e *by vyžadovalo předchozí výpočet teploty před zkratem* θ_b *a několik iteračních kroků pro výpočet zkratového proudu a konečné teploty vodiče, což by bylo zcela v rozporu se zásadami deklarovanými v čl.1.1 normy [2] a technické zprávě [3] . V technické zprávě [7] není, bohužel, příklad výpočtu minimálních zkratových proudů, který by osvětlil použití vzorce (5.1). Národní poznámka doplněná do českého vydání [2] naznačuje možnost uvažovat odpor vodičů odpovídající jejich maximální dovolené provozní teplotě. Některé výpočetní programy se vyrovnávají s touto nedokonalost normy tím, že jako teplotu* θ_e *uvažují maximální dovolenou teplotu vodičů při zkratu. Lze si však těžko představit, že by vodiče všech vedení v soustavě mohly při konkrétním místu zkratu dosáhnout této limitní teploty. Určitým kompromisem může být kombinace obou postupů, například taková, že maximální dovolená teplota vodičů na konci zkratu se uvažuje pouze u vedení přímo připojených do místa zkratu, u ostatních vedení se pak bere maximální dovolená provozní teplota apod.*

Zkratové impedance elektrického zařízení

V případě síťových napáječů, transformátorů, venkovních vedení, kabelů, reaktorů a podobných zařízení je jejich zpětná impedance rovna impedanci sousledné: $\underline{Z}_{(2)} = \underline{Z}_{(1)}$. Netočivá zkratová impedance $\underline{Z}_{(0)} = \underline{U}_{(0)}/\underline{I}_{(0)}$ se určuje ze střídavého napětí uvažovaného mezi třemi paralelními vodiči a společným zpětným vedením (například zemí, zemnicím zařízením, nulovým vodičem, zemnicím vodičem, kabelovým pláštěm a kabelovým pancířem). V tomto případě protéká společným zpětným vedením trojnásobek proudu netočivé složky.

Vzhledem k tomu, že vnitřní napětí zdrojů jsou obecně odlišná od napětí ekvivalentního zdroje v místě zkratu a transformátory bývají vybaveny přepínatelnými odbočkami, musí se impedance generátorů, síťových transformátorů a elektrárenských bloků při výpočtu zkratových proudů metodou ekvivalentního zdroje v místě zkratu korigovat součiniteli K_G, K_T , K_S nebo K_{SO}, $K_{G,S}$ a $K_{T,S}$, nebo $K_{G,SO}$ a $K_{T,SO}$.

Síťové napáječe

Ekvivalentní sousledná zkratová impedance sítě Z_Q v bodě připojení napáječe Q se určí ze zkratového příspěvku I''_{kQ} :

$$Z_Q = \frac{cU_{nQ}}{\sqrt{3}I''_{kQ}} \quad ; \qquad X_Q = \frac{Z_Q}{\sqrt{1+(R_Q/X_Q)^2}} \tag{5.2}$$

Počáteční rázový zkratový proud I''_{kQmax} a I''_{kQmin} na straně vyššího napětí transformátoru musí udat provozovatel přenosové (distribuční) soustavy, nebo se musí určit příslušným výpočetním postupem podle této normy. Při napájení venkovním vedením o jmenovitém napětí nad 35 kV je možné uvažovat R_Q=0. V ostatních případech, není-li známa přesnější hodnota, lze brát R_Q=0,1 X_Q a X_Q=0,995 Z_Q. V zvláštních případech, podle zapojení vinutí transformátorů a způsobu uzemnění uzlu vinutí, může být nutné použít též ekvivalentní netočivou impedanci síťového napáječe.

Dvouvinuťové transformátory

Souslednou zkratovou impedanci $\underline{Z}_T = R_T + jX_T$ lze vypočítat ze jmenovitých údajů transformátoru:

$$Z_T = \frac{u_{kr}}{100\ \%} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} \quad ; \qquad R_T = \frac{u_{Rr}}{100\ \%} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{P_{krT}}{3\,I_{rT}^2} \quad ; \qquad X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \tag{5.3}$$

Netočivá zkratová impedance transformátorů $\underline{Z}_{(0)T} = R_{(0)T} + jX_{(0)T}$ může být získána od výrobce. Jinak též [7] .

Impedance sousledná, zpětná i netočivá dvouvinuťového síťového transformátoru s přepínačem odboček při zatížení i bez něj se musí korigovat součinitelem K_T: $\underline{Z}_{TK} = K_T\,\underline{Z}_T$ kde $\underline{Z}_T = R_T + jX_T$.

$$K_T = 0{,}95\,\frac{c_{max}}{1\ +\ 0{,}6\,x_T} \qquad \textbf{(5.4)}$$

kde x_T je poměrná reaktance transformátoru $x_T = X_T/(U_{rT}^2/S_{rT})$ a c_{max} z tabulky 1 odpovídá jmenovitému napětí sítě připojené ke straně nižšího napětí síťového transformátoru. Tento korekční součinitel se nesmí použít pro blokové transformátory. Impedance mezi uzlem transformátoru a zemí se zahrnuje do netočivé soustavy svým trojnásobkem, bez korekce.

Norma uvádí též výraz pro výpočet korekčního součinitele K_T z dlouhodobě známých provozních hodnot před zkratem U^b, I_T^b a $\sin\varphi_T^b$:

$$K_T = \frac{U_n}{U^b}\cdot\frac{c_{max}}{1 + x_T(I_T^b/I_{rT})\sin\varphi_T^b} \qquad \textbf{(5.5)}$$

Trojvinuťové transformátory

Sousledné zkratové impedance $\underline{Z}_A$, $\underline{Z}_B$ a $\underline{Z}_C$ pro náhradní Y schéma transformátoru lze vypočítat z hodnot napětí nakrátko, vztažených na stranu A:

$$\underline{Z}_{AB} = \left(\frac{u_{RrAB}}{100\,\%} + \mathrm{j}\frac{u_{XrAB}}{100\,\%}\right)\cdot\frac{U_{rTA}^2}{S_{rTAB}};\ \underline{Z}_{AC} = \left(\frac{u_{RrAC}}{100\,\%} + \mathrm{j}\frac{u_{XrAC}}{100\,\%}\right)\cdot\frac{U_{rTA}^2}{S_{rTAC}};\ \underline{Z}_{BC} = \left(\frac{u_{RrBC}}{100\,\%} + \mathrm{j}\frac{u_{XrBC}}{100\,\%}\right)\cdot\frac{U_{rTA}^2}{S_{rTBC}} \quad \text{(strana C rozpojena)}$$

(strana B rozpojena) (strana A rozpojena) $u_{XrAC} = \sqrt{u_{krAC}^2 - u_{RrAC}^2}$; $u_{XrAC} = \sqrt{u_{krAC}^2 - u_{RrAC}^2}$; $u_{XrAC} = \sqrt{u_{krAC}^2 - u_{RrAC}^2}$ **(5.6)**

pomocí vzorců

$$\underline{Z}_A = \frac{1}{2}(\underline{Z}_{AB} + \underline{Z}_{AC} - \underline{Z}_{BC}) \quad ; \quad \underline{Z}_B = \frac{1}{2}(\underline{Z}_{BC} + \underline{Z}_{AB} - \underline{Z}_{AC}) \quad ; \quad \underline{Z}_C = \frac{1}{2}(\underline{Z}_{AC} + \underline{Z}_{BC} - \underline{Z}_{AB}) \qquad \textbf{(5.7)}$$

Netočivé impedance trojvinuťového transformátoru $\underline{Z}_{(0)T} = R_{(0)T} + \mathrm{j}X_{(0)T}$ mohou být získány od výrobce. Jinak též [5] a [7] .

Při výpočtu se sousledné, zpětné i netočivé impedance $\underline{Z}_{AB}$, $\underline{Z}_{AC}$ a $\underline{Z}_{BC}$ korigují korekčními činiteli

$$K_{TAB} = 0{,}95\,\frac{c_{max}}{1\ +\ 0{,}6\,x_{TAB}} \quad ; \quad K_{TAC} = 0{,}95\,\frac{c_{max}}{1\ +\ 0{,}6\,x_{TAC}} \quad ; \quad K_{TBC} = 0{,}95\,\frac{c_{max}}{1\ +\ 0{,}6\,x_{TBC}} \qquad \textbf{(5.8)}$$

Venkovní vedení a kabely

Souslednou zkratovou impedanci $\underline{Z}_L = R_L + jX_L$ lze vypočítat z údajů, jako jsou materiál, průřezy a rozteče vodičů, případně lze použít katalogových hodnot výrobce nebo hodnot naměřených. Platí $\underline{Z}_{(2)} = \underline{Z}_{(1)}$. Měření sousledných impedancí $\underline{Z}_{(1)} = R_{(1)} + jX_{(1)}$ a netočivých impedancí $\underline{Z}_{(0)} = R_{(0)} + jX_{(0)}$ je např. v [7] . Obtížnější je obvykle určení netočivé impedance Někdy je možné vypočítat netočivé impedance s pomocí poměrů $R_{(0)L}/R_L$ a $X_{(0)L}/X_L$ (viz [4]).

Impedance $\underline{Z}_{(1)L}$ a $\underline{Z}_{(0)L}$ nn a vn kabelů závisejí na pracovních postupech výrobců a normách jednotlivých států a mohou se vzít z publikace [4] , z příruček nebo podle údajů výrobce.

Pro vyšší teploty než 20 °C lze použít rovnici (5.1).

Rezistance na jednotku délky R'_L venkovních vedení při teplotě vodiče 20 °C lze vypočítat z jmenovitého průřezu q_n a rezistivity ρ:

$R'_L = \dfrac{\rho}{q_n}$; měď: $\rho = \dfrac{1}{54}\dfrac{\Omega\text{mm}^2}{\text{m}}$; hliník: $\rho = \dfrac{1}{34}\dfrac{\Omega\text{mm}^2}{\text{m}}$; slitina hliníku: $\rho = \dfrac{1}{31}\dfrac{\Omega\text{mm}^2}{\text{m}}$	**(5.9)**

Reaktanci na jednotku délky X'_L pro venkovní transponované vedení je možné vypočítat ze vzorce:

$$X'_L = 2\pi f \frac{\mu_0}{2\pi}\left(\frac{1}{4n} + \ln\frac{d}{r}\right) = f\mu_0\left(\frac{1}{4n} + \ln\frac{d}{r}\right)$$ $d = \sqrt[3]{d_{L1L2}d_{L2L3}d_{L3L1}}$ je geometrická střední vzdálenost mezi vodiči či středem svazků, r je poloměr jednoduchého vodiče. V případě svazkových vodičů se za r dosadí $r_B = \sqrt[n]{nrR^{n-1}}$, kde R je poloměr svazku (viz [5]), n je počet vodičů ve svazku; pro jednoduchý vodič n = 1, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m.	**(5.10)**

Reaktory omezující zkratový proud

Sousledné, zpětné a netočivé zkratové impedance jsou, za předpokladu geometrické souměrnosti, stejné.

$Z_{\mathrm{R}} = \dfrac{u_{\mathrm{kR}}}{100\ \%} \dfrac{U_{\mathrm{n}}}{\sqrt{3}\, I_{\mathrm{rR}}}$; $R_{\mathrm{R}} << X_{\mathrm{R}}$	**(5.11)**

Synchronní generátory

Korigovaná impedance generátoru bez blokového transformátoru pro výpočet počátečních souměrných rázových zkratových proudů na generátorovém napětí:

$\underline{Z}_{\mathrm{GK}} = K_{\mathrm{G}} \underline{Z}_{\mathrm{G}} = K_{\mathrm{G}} (R_{\mathrm{G}} + \mathrm{j}\, X''_{\mathrm{d}})$; $K_{\mathrm{G}} = \dfrac{U_{\mathrm{n}}}{U_{\mathrm{rG}}} \cdot \dfrac{c_{\max}}{1 + x''_{\mathrm{d}} \sin \varphi_{\mathrm{rG}}}$; $x''_{\mathrm{d}} = X''_{\mathrm{d}} / Z_{\mathrm{rG}}$ Pokud je napětí na svorkách generátoru odlišné od U_{rG}, použije se místo U_{rG} hodnota $U_{\mathrm{G}} = U_{\mathrm{rG}} (1 + p_{\mathrm{G}})$. Součinitel K_{G} se použije i na zpětnou impedanci $\underline{Z}_{(2)\mathrm{G}}$ a netočivou impedanci $\underline{Z}_{(0)\mathrm{G}}$.	**(5.12)**

***Poznámka*:** *Uvedený postup podle [2] není vhodný pro modelování podbuzeného generátoru.*

Při výpočtu I''_k lze použít fiktivní rezistance R_{Gf}, které slouží též pro výpočet nárazového zkratového proudu i_{p}.

$R_{\mathrm{Gf}} = 0{,}05\ X''_{\mathrm{d}}$ pro generátory s $U_{\mathrm{rG}} > 1$ kV a $S_{\mathrm{rG}} \geq 100$ MVA,

$R_{\mathrm{Gf}} = 0{,}07\ X''_{\mathrm{d}}$ pro generátory s $U_{\mathrm{rG}} > 1$ kV a $S_{\mathrm{rG}} < 100$ MVA,

$R_{\mathrm{Gf}} = 0{,}15\ X''_{\mathrm{d}}$ pro generátory s $U_{\mathrm{rG}} \leq 1\ 000$ V.

Poznámka: *Fiktivní rezistance R_{Gf} byly stanoveny tak, aby vyhovovaly při výpočtu nárazového zkratového proudu i_{p} vzorci (5.22) a (5.23). Mimo zánik stejnosměrné složky zahrnují též zánik střídavé složky zkratového proudu během první půlvlny jeho průběhu. Tyto fiktivní hodnoty však nelze použít při výpočtu aperiodické složky zkratového proudu $i_{\mathrm{d.c.}}$ v rovnici (5.29).Skutečné hodnoty rezistancí R_{G} bývají podstatně menší.*

Synchronní kompenzátory

Pro výpočty parametrů zkratového proudu I''_k, i_p, I_b a I_k se synchronní kompensátory modelují stejně jako synchronní generátory.

Synchronní motory

Synchronní motory s napěťovou regulací se uvažují jako synchronní generátory. Pokud tuto regulaci nemají, ***je třeba použít zvláštní postupy***.

Elektrárenský blok s přepínačem odboček při zatížení

Celý elektrárenský blok s blokovým transformátorem s přepínačem odboček pod zatížením (S) se pro výpočet zkratu na straně vyššího napětí blokového transformátoru nahradí korigovanou impedancí $\underline{Z}_\mathrm{S}$:

$$\underline{Z}_\mathrm{S} = K_\mathrm{S}(t_\mathrm{r}^2 \underline{Z}_\mathrm{G} + \underline{Z}_\mathrm{THV}) \quad ; \quad K_\mathrm{S} = \frac{U_\mathrm{nQ}^2}{U_\mathrm{rG}^2} \cdot \frac{U_\mathrm{rTLV}^2}{\mathrm{U}_\mathrm{rTHV}^2} \cdot \frac{c_\mathrm{max}}{1 + |x''_\mathrm{d} - x_\mathrm{T}| \sin\varphi_\mathrm{rG}} \qquad \textbf{(5.13)}$$

$\underline{Z}_\mathrm{G}$ rázová impedance generátoru v sousledné soustavě: $\underline{Z}_\mathrm{G} = R_\mathrm{G} + \mathrm{j}\, X''_\mathrm{d}$ (bez korekčního součinitele K_G),

t_r jmenovitý převod blokového transformátoru: $t_\mathrm{r} = U_\mathrm{rTHV} / U_\mathrm{rTLV}$,

$\underline{Z}_\mathrm{THV}$ impedance blokového transformátoru vztažená ke straně vyššího napětí (bez korekčního součinitele K_T),

U_nQ jmenovité napětí soustavy v bodě Q, kam je elektrárenský blok připojen,

U_rG jmenovité napětí generátoru,

φ_rG fázový úhel mezi $\underline{I}_\mathrm{rG}$ a $\underline{U}_\mathrm{rG} / \sqrt{3}$,

x''_d poměrná rázová reaktance generátoru vztažená ke jmenovité impedanci $x''_\mathrm{d} = X''_\mathrm{d} / Z_\mathrm{rG}$,

kde $Z_\mathrm{rG} = U_\mathrm{rG}^2 / S_{rG}$,

x_T poměrná reaktance blokového transformátoru při přepínači odboček pod zatížením v základní poloze: $x_\mathrm{T} = X_\mathrm{T} / \left(U_\mathrm{rT}^2 / S_\mathrm{rT}\right)$.

Při výpočtu zkratových proudů na straně vyššího napětí blokového transformátoru lze zanedbat příspěvky motorů připojených k odbočkovému transformátoru. V normě [2] jsou uvedeny úpravy vzorce (5.13) pro výpočet korekčního součinitele K_S v některých specifických provozních podmínkách a vymezeno použití tohoto součinitele při výpočtu nesouměrných zkratů pro generátor, s přihlédnutím k tomu, zda je či není provozován v podbuzeném chodu.

Elektrárenský blok bez přepínače odboček při zatížení

Celý elektrárenský blok s blokovým transformátorem bez přepínače odboček pod zatížením (SO) se pro výpočet zkratu na straně vyššího napětí blokového transformátoru nahradí impedancí $\underline{Z}_{\mathrm{SO}}$:

$$\underline{Z}_{\mathrm{SO}} = K_{\mathrm{SO}}(t_{\mathrm{r}}^2 \underline{Z}_{\mathrm{G}} + \underline{Z}_{\mathrm{THV}}) \quad ; \quad K_{\mathrm{SO}} = \frac{U_{\mathrm{nQ}}}{U_{\mathrm{rG}}(1+p_{\mathrm{G}})} \cdot \frac{U_{\mathrm{rTLV}}}{\mathrm{U}_{\mathrm{rTHV}}} \cdot (1 \pm p_{\mathrm{T}}) \cdot \frac{c_{\max}}{1 + x''_{\mathrm{d}} \sin \varphi_{\mathrm{rG}}} \qquad \textbf{(5.14)}$$

Stejný korekční součinitel se použije i pro korekci zpětné a netočivé impedance bloku, a to bez ohledu na to, zda byl generátor podbuzen nebo přebuzen. Impedance mezi uzlem transformátoru a zemí se zahrnuje do netočivé soustavy svým trojnásobkem, bez korekce.

Poznámka: *Za zmínku snad stojí, že v prvním vydání norma IEC 909:1988 vzorce pro elektrárenský blok bez přepínače odboček při zatížení - tedy v ČR poměrně běžné řešení - vůbec neuváděla. Výraz* $(1 \pm p_{\mathrm{T}})$ *musí být zaveden, jestliže je přepínač odboček bez zatížení trvale mimo jmenovitou odbočku. Pro největší zkratový příspěvek na straně vyššího napětí blokového transformátoru se použije* $(1 - p_{\mathrm{T}})$.

Asynchronní motory

Při výpočtu maximálních hodnot zkratových proudů se musí uvažovat příspěvek motorů vn, které mohou být v okamžiku zkratu v současném chodu. Při výpočtu těchto zkratů ve vlastní spotřebě elektráren a v průmyslových a podobných rozvodech (chemický a hutní průmysl, kompresorovny, čerpací stanice apod.) se musí do výpočtu zahrnout také příspěvek motorů nn.

Impedance $\underline{Z}_M = R_M + jX_M$ asynchronních motorů v sousledné a zpětné složkové soustavě lze určit vzorci:

$$Z_M = \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \cdot \frac{U_{rM}}{\sqrt{3}I_{rM}} = \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \cdot \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}} \quad ; \quad X_M = \frac{Z_M}{\sqrt{1 + (R_M / X_M)^2}} \qquad \textbf{(5.15)}$$

Impedance motorů Z_M se použije při výpočtu počátečních rázových zkratových proudů pro souslednou i zpětnou složku. Pokud jsou potřebné netočivé impedance $Z_{(0)M}$, musí je udat výrobce motorů.

S dostatečnou přesností je možno brát, podle normy [2] :

R_M/X_M =0,10, s X_M = 0,995 Z_M pro motory vn o výkonu P_{rM} na dvojici pólů ≥ 1 MW;

R_M/X_M =0,15, s X_M = 0,989 Z_M pro motory vn o výkonu P_{rM} na dvojici pólů < 1 MW;

R_M/X_M =0,42, s X_M = 0,922 Z_M pro skupiny nn motorů včetně připojovacích kabelů.

Po zjednodušení výpočtu se obvykle motory nn připojené do jednoho rozváděče a jejich napájecí kabely nahrazují jedním ekvivalentním motorem. Ve vzorci (5.15) se podle normy použije jako I_{rM} součet jmenovitých proudů všech motorů ve skupině, I_{LR}/I_{rM} = 5.

Příspěvek asynchronních motorů ke zkratovému proudu se může zanedbat, jestliže tento příspěvek není větší než 5 % počátečního zkratového proudu bez motorů. Norma dále uvádí některé výrazy, odvozené z tohoto pravidla, umožňující posoudit možnost zanedbání zkratového příspěvku motorů.

Výrazy pro **výpočet zkratových proudů při zkratu na svorkách asynchronních motorů** jsou v normě [2] soustředěny v Tabulce 3. V uzemněných soustavách nelze vliv motorů při zkratu mezi fází a zemí zanedbat. U motorů se bere $Z_{(1)M} = Z_{(2)M} = Z_M$. Pokud nemá motor uzemněné vinutí, je $Z_{(0)M} = \infty$.

Pohony se statickými měniči

Uvažují se příspěvky pouze při trojfázovém zkratu pro stanovení I''_k a i_p a to jen od těch pohonů se statickými měniči, které jsou schopny při brzdění dodávat energii zpět do sítě.

Ve vzorci (5.15) se přitom použijí jako U_{rM} a I_{rM} jmenovité hodnoty statického měniče (nebo jeho transformátoru) na straně sítě,

$I_{LR}/I_{rM} = 3$

a $R_M/X_M = 0{,}10$.

Kondenzátory a nemotorické zátěže

Podle [2] je nutno uvažovat kondenzátory a filtry vysokonapěťových stejnosměrných přenosů při výpočtu střídavých zkratových proudů a sériové kondenzátory, pokud nejsou vybaveny paralelním zařízením na omezování napětí při zkratu.

Výpočet parametrů zkratových proudů

Základní úlohou při výpočtu parametrů zkratového proudu pro dané místo zkratu je určení počátečního souměrného rázového zkratového proudu I''_k v místě zkratu a obvykle též zkratových příspěvků ze kterých je tento proud složen a které přitékají do zkratu po větvích k místu zkratu přímo připojených. V závislosti na uspořádání elektrické sítě a místě zkratu je vhodné rozlišit příspěvky přitékající do místa zkratu od zdroje zkratového proudu samostatnou cestou (jednoduché zkraty, nezauzlená síť, radiální síť) zkratové příspěvky od více zdrojů, přitékající společnou cestou (mřížová síť). Při výpočtu zkratových proudů uvnitř elektrárenského bloku (mezi generátorem, blokovým transformátorem a odbočkovým transformátorem vlastní spotřeby) norma [2] požaduje použití odlišných korekčních součinitelů pro blok s blokovým transformátorem regulačním (s přepínačem odboček při zatížení) a bez přepínání odboček při zatížení.

K orientačnímu posouzení, který typ zkratu vede k největšímu zkratovému proudu, je v normě přibližný diagram. V běžném případě, pro $\underline{Z}_{(0)}>\underline{Z}_{(1)}$ a $\underline{Z}_{(2)}=\underline{Z}_{(1)}$, dává největší počáteční zkratový proud I''_k zkrat trojfázový. Při zkratu v blízkosti transformátorů s vinutím zapojeným do trojúhelníka, s nízkou netočivou impedancí $\underline{Z}_{(0)}$, je největší zkratový proud tekoucí do země při dvoufázovém zemním zkratu. V tomto případě může být též proud při jednofázovém zkratu větší než při zkratu trojfázovém.

Při zkratu elektricky vzdáleném se obvykle určuje počáteční rázový zkratový proud I''_k a nárazový zkratový proud i_p, případně též ekvivalentní oteplovací proud I_{th} pro dobu trvání zkratu T_K. Pro elektricky blízký zkrat je obvykle vyžadováno určit i souměrný zkratový vypínací proud I_b a stejnosměrnou složku zkratového proudu $i_{d.c.}$ pro nejkratší dobu vypnutí t_{min}.

***Poznámka**: Postup použitý v normě nepočítá s tím, že průběh zkratového proudu může dosáhnout poprvé nuly až po několika periodách. Tento případ může nastat v případě zkratu v blízkosti generátoru, pokud aperiodická stejnosměrná složka zkratového proudu zaniká pomaleji než jeho souměrná složka střídavá.*

Počáteční souměrný rázový zkratový proud

Pro výpočet počátečního rázového zkratového proudu I''_k metodou ekvivalentního zdroje napětí v místě zkratu norma [2] uvádí následující výrazy:

Zkrat trojfázový	$\underline{I}''_{\mathrm{k}} = \dfrac{\mathrm{c}U_{\mathrm{n}}}{\sqrt{3}\,\underline{Z}_{\mathrm{k}}}$; $I''_{\mathrm{k}} = \dfrac{\mathrm{c}U_{\mathrm{n}}}{\sqrt{3}Z_{\mathrm{k}}} = \dfrac{\mathrm{c}U_{\mathrm{n}}}{\sqrt{3}\sqrt{R_{\mathrm{k}}^2 + X_{\mathrm{k}}^2}}$	**(5.16)**
Zkrat jednofázový	$\underline{I}''_{\mathrm{k1}} = \dfrac{\sqrt{3}\mathrm{c}U_{\mathrm{n}}}{\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(0)}}$; $I''_{\mathrm{k1}} = \dfrac{\sqrt{3}cU_{\mathrm{n}}}{\lvert 2\,\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(0)}\rvert}$ Pro elektricky vzdálený zkrat, $\underline{\boldsymbol{Z}}_{(2)}=\underline{\boldsymbol{Z}}_{(1)}$	**(5.17)**
Zkrat dvoufázový	$\underline{I}''_{\mathrm{k2}} = \dfrac{\mathrm{c}U_{\mathrm{n}}}{\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)}}$; $I''_{\mathrm{k2}} = \dfrac{cU_{\mathrm{n}}}{2\lvert\underline{Z}_{(1)}\rvert} = \dfrac{\sqrt{3}}{2} I''_k$ Pro elektricky vzdálený zkrat, $\underline{\boldsymbol{Z}}_{(2)}=\underline{\boldsymbol{Z}}_{(1)}$	**(5.18)**
Zkrat dvoufázový zemní, zkratový proud z fáze L2	$\underline{I}''_{\mathrm{k2EL2}} = -\mathrm{j}\,cU_{\mathrm{n}} \dfrac{\underline{Z}_{(0)} - \underline{\mathrm{a}}\,\underline{Z}_{(2)}}{\underline{Z}_{(1)}\,\underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(1)}\,\underline{Z}_{(0)} + \underline{Z}_{(2)}\,\underline{Z}_{(0)}}$; $I''_{\mathrm{k2EL2}} = cU_{\mathrm{n}} \dfrac{\lvert\underline{Z}_{(0)}/\underline{Z}_{(1)} - \underline{\mathrm{a}}\rvert}{\lvert\underline{Z}_{(1)} + 2\,\underline{Z}_{(0)}\rvert}$ Pro elektricky vzdálený zkrat, $\underline{\boldsymbol{Z}}_{(2)}=\underline{\boldsymbol{Z}}_{(1)}$	**(5.19)**
Zkrat dvoufázový zemní, zkratový proud z fáze L3	$\underline{I}''_{\mathrm{k2EL3}} = \mathrm{j}\,cU_{\mathrm{n}} \dfrac{\underline{Z}_{(0)} - \underline{\mathrm{a}}^2\,\underline{Z}_{(2)}}{\underline{Z}_{(1)}\,\underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(1)}\,\underline{Z}_{(0)} + \underline{Z}_{(2)}\,\underline{Z}_{(0)}}$; $I''_{\mathrm{k2EL3}} = cU_{\mathrm{n}} \dfrac{\lvert\underline{Z}_{(0)}/\underline{Z}_{(1)} - \underline{\mathrm{a}}^2\rvert}{\lvert\underline{Z}_{(1)} + 2\,\underline{Z}_{(0)}\rvert}$ Pro elektricky vzdálený zkrat, $\underline{\boldsymbol{Z}}_{(2)}=\underline{\boldsymbol{Z}}_{(1)}$	**(5.20)**
Zkrat dvoufázový zemní, zkratový proud procházející do země a zemí	$\underline{I}''_{\mathrm{kE2E}} = -\dfrac{\sqrt{3}cU_n\,\underline{Z}_{(2)}}{\underline{Z}_{(1)}\,\underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(1)}\,\underline{Z}_{(0)} + \underline{Z}_{(2)}\,\underline{Z}_{(0)}}$; $I''_{\mathrm{kE2E}} = \dfrac{\sqrt{3}\,cU_{\mathrm{n}}}{\lvert\underline{Z}_{(1)} + 2\,\underline{Z}_{(0)}\rvert}$ Pro elektricky vzdálený zkrat, $\underline{\boldsymbol{Z}}_{(2)}=\underline{\boldsymbol{Z}}_{(1)}$	**(5.21)**

Při výpočtu se použijí korigované hodnoty impedancí, přepočtené na jmenovité napětí v místě zkratu pomocí druhé mocniny jmenovitého převodu transformátorů. (Pokud jsou dvě soustavy spojeny transformátory s malým rozdílem jmenovitých transformačních převodů, lze použít aritmetického průměru převodů.) Vzorce pro trojfázový zkrat lze použít pro výpočet zkratových příspěvků radiálně připojených zdrojů i pro výslednou zkratovou impedanci určenou postupným zjednodušováním mřížové sítě**. Výsledný zkratový proud v místě zkratu je dán vektorovým součtem jednotlivých příspěvků, připouští se však jeho určení součtem absolutních hodnot.**

.

Poznámka*: V normě uvedené sčítání zkratových příspěvků při trojfázovém zkratu nelze, bez výhrad, použít v případě zkratů nesymetrických. Při zkratu jednofázovém a dvoufázovém zemním se uvedenými vzorci po dosazení výsledných výpočtových impedancí určí celkový zkratový proudu v místě zkratu, zkratové proudy protékající větvemi jsou pak dány vektorovým součtem příslušných dílčích proudů protékajících větvemi v jednotlivých souměrných složkových soustavách.*

Nárazový zkratový proud

Nárazový zkratový proud i_p je maximální možná okamžitá hodnota předpokládaného zkratového proudu, které lze dosáhnout tehdy, jestliže zkrat nastane v takovém okamžiku, že se vyvine největší stejnosměrná složka zkratového proudu. Této hodnoty bývá dosaženo během první půlvlny průběhu zkratového proud a v daném ideálním nejméně příznivém případě to je přibližně v čase 0,01 s (při kmitočtu 50 Hz). Velikost nárazového zkratového proudu je rozhodující pro určení silových účinků zkratového proudu. Odvozuje se z hodnoty počátečního souměrného rázového zkratového proudu I_k'' součinitelem κ:

$$i_p = \kappa\sqrt{2}I_k'' \qquad \textbf{(5.22)}$$

Součinitel κ přitom závisí na poměru R/X. V normě [2] je uveden přibližný vzorec, který vyhovuje i pro frekvenci sítě 60 Hz:

$$\kappa = 1{,}02 + 0{,}98^{-3\,R/X} \qquad \textbf{(5.23)}$$

Takto lze <u>při trojfázovém zkratu</u> přiřadit hodnoty i_p zkratovým příspěvkům nepřitékajícím do místa zkratu společnou cestou, a to při zkratu elektricky blízkém i elektricky vzdáleném. Výsledný nárazový zkratový proud je v takovém případě možné určit prostým součtem i_p jednotlivých zkratových příspěvků, pro synchronní stroje je však nutné namísto skutečných rezistancí použít <u>fiktivní rezistance</u> R_{Gf}, pro asynchronní motory pak normou udané poměry R_M/X_M .

***Poznámka 1**: Odůvodnění vzorce pro součinitel κ je v technické zprávě* [3] *, kde jsou také vyneseny přesné hodnoty κ určené postupnými iteracemi. Z odůvodnění přitom vyplývá, že hodnoty i_p je dosaženo v čase do 10 ms po vzniku zkratu – ne tedy v době „přibližně po polovině prvního cyklu“, jak nás informuje základní norma* [2] .

***Poznámka 2**: Výraz pro výpočet κ je odvozen z výrazu platného pro zkratový proud s konstantní střídavou složkou, tedy pro elektricky vzdálený zkrat. V normě uvedené fiktivní rezistance synchronních strojů a asynchronních motorů jsou však stanoveny tak, aby výsledkem výpočtu byly obvykle dosahované (změřené) hodnoty nárazového zkratového proudu i_p při zkratu na svorkách stroje. Dosazením „nesprávných“ hodnot do „nesprávného“ vzorce dostáváme pak „správný“ výsledek i pro zkraty elektricky blízké.*

Pro **zkrat v mřížových sítích**, kdy mohou zkratové proudy přitékat do místa zkratu kombinací paralelních a sériových větví, nebo „společnou cestou“ z různých zdrojů, norma IEC 60909-0 [2] presentuje, technická zpráva IEC 60909-1 [3] analyzuje a technická zpráva IEC 60909-4 [7] na příkladech dokládá **použití tří odlišných metod**, kterými lze stanovit součinitel nárazového zkratového proudu κ. Všechny tyto metody vycházejí z náhradního schématu soustavy s korigovanými hodnotami impedancí, liší se pracností, přesností výsledku i možnostmi použití.

a) Jednotný (nejmenší) poměr R/X

Ze všech větví protékaných zkratovým proudem se vyberou větve ze stejné napěťové oblasti a větve s transformátory připojenými do místa zkratu. (Větev může tvořit více impedancí v sérii.) Ke stanovení součinitele κ vzorcem (5.23) se použije nejmenší poměr R/X z takto vybraných větví.

Metoda dává nejméně přesné, i když konzervativní, výsledky. Může vést ke značnému předimenzování zařízení. Měla by být používána pouze pro předběžný odhad, pro výpočty se zanedbáním rezistencí menších než 0,3 X apod.

b) Poměr R/X v místě zkratu

Ve vzorci (5.23) se použije poměr R/X výsledné výpočtové impedance v místě zkratu, který se vynásobí „bezpečnostním“ součinitelem 1,15. Tento součinitel se nepoužije, pokud R/X všech větví je menší než 0,3. Výsledná hodnota se omezuje horní hranicí 1,8 při zkratu v síti nn a 2,0 v sítích vn, vvn a zvn.

Metoda dává přesnější výsledky než a), které však mohou být i nekonzervativní. Nedoporučuje se proto její použití v případech, kdy není u všech větví sítě splněna podmínka $0{,}005 \le R/X \le 1{,}0$.

c) Ekvivalentní kmitočet fc

V náhradním schématu se impedance jednotlivých prvků přepočtou pro kmitočet f_c = 20 Hz (při síťovém kmitočtu f = 50 Hz), případně 25 Hz (síť 60 Hz) a z těchto hodnot se pro dané místo zkratu spočítá výsledná impedance Z_c a určí poměr R_c/X_c. Tento poměr, vynásobený hodnotou f_c/f (tedy 0,4 - pro 50 Hz) se použije jako hodnota R/X pro určení výsledné hodnoty κ vzorcem (5.23).

Pro **jednofázový zkrat** se počítá součinitel κ podle zapojení sítě obdobně jako pro trojfázový zkrat, při použití metody ekvivalentního kmitočtu se použije $\underline{Z}_c = \underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(0)}$. Norma však připouští použít stejný součinitel κ jako pro trojfázový zkrat.

Pro **dvoufázový zkrat** se počítá součinitel κ podle zapojení sítě obdobně jako pro trojfázový zkrat, při použití metody ekvivalentního kmitočtu se použije $\underline{Z}_c = \underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)}$. Norma připouští použít stejný součinitel κ jako pro trojfázový zkrat. Pokud $\underline{Z}_{(1)}=\underline{Z}_{(2)}$, potom $i_{p2} = \left(\sqrt{3}/2\right) i_p$, nárazový zkratový proud při dvoufázovém zkratu je menší, než při zkratu trojfázovém.

Výpočet i_{p2E} při **dvoufázovém zemním zkratu** přichází do úvahy pouze v případě, že $\underline{Z}_{(0)}$ je menší než $\underline{Z}_{(1)}/4$.

Vypínací zkratový proud

Pro kontrolu vypínací schopnosti spínacích přístrojů se určuje zkratový proud, který prochází přístrojem v okamžiku přerušení kontaktů jeho prvého vypínajícího pólu. Přitom se bere nejkratší doba vypnutí t_{min}, daná součtem nejkratší možné doby působení ochrany (bez časového zpoždění) a nejkratší doby vypnutí spínacího přístroje. V tomto okamžiku má vypínaný zkratový proud souměrnou střídavou složku I_b a stejnosměrnou složku $i_{d.c.}$ v čase t_{min}.

***Poznámka**: Ve starší české literatuře je namísto termínu „vypínací zkratový proud“ (který spíše charakterizuje vlastnost přístroje) používán zřejmě vhodnější termín „vypínaný zkratový proud“. Normy IEC nezavedly symbol pro označení stejnosměrné (asymetrické)složky zkratového proudu v okamžiku jeho vypnutí, v ČSN dříve používané označení bylo* $I_{a\,vyp}$.

Souměrný vypínací zkratový proud I_b

U **elektricky vzdálených zkratů** mají souměrné vypínací proudy stejnou velikost jako počáteční rázový zkratový proud, bez ohledu na typ zkratu:

$$I_b = I''_k \quad ; \quad I_{b1} = I''_{k1} \quad ; \quad I_{b2} = I''_{k2} \quad ; \quad I_{b2E} = I''_{k2E} \qquad \textbf{(5.24)}$$

Souměrný vypínací proud příspěvku **synchronního stroje radiálně připojeného** do místa zkratu **při elektricky blízkém trojfázovém zkratu** se odvozuje od počátečního rázového zkratového proudu vynásobením součinitelem μ :

$$I_b = \mu I''_k \qquad \textbf{(5.25)}$$

Součinitel μ, který vyjadřuje zmenšování střídavé složky zkratového proudu s časem.. V normě [2] jsou výrazy i diagram sloužící k určení hodnoty μ v závislosti na době vypnutí t_{min} a na poměrné velikosti počátečního rázového zkratového proudu na svorkách stroje I''_{kG}/I_{rG} , kterým synchronní stroj do zkratu přispívá, použitelné

- pro stroje s budiči rotačními,
- pro stroje se statickými budiči se stropním budícím napětí menším než 1,6 budícího napětí při jmenovitém zatížení a pro dobu vypnutí $t_{min} < 0{,}25$ s (jinak se bere μ=1),
- pro generátory nn s kompaudním systémem buzení pro dobu vypnutí $t_{min} < 0{,}15$ s (jinak se I_b stanoví podle podkladů výrobce).

$$\mu = 0{,}84 + 0{,}26\, e^{-0{,}26\, I''_{kG}/I_{rG}} \;;\; \mu = 0{,}71 + 0{,}51\, e^{-0{,}30\, I''_{kG}/I_{rG}} \;;\; \mu = 0{,}62 + 0{,}72\, e^{-0{,}32\, I''_{kG}/I_{rG}} \;;\; \mu = 0{,}56 + 0{,}94\, e^{-0{,}38\, I''_{kG}/I_{rG}} \qquad \textbf{(5.26)}$$

pro $t_{min} = 0{,}02$ s pro $t_{min} = 0{,}05$ s pro $t_{min} = 0{,}10$ s pro $t_{min} \geq 0{,}25$ s

***Poznámka**: Výrazy pro μ byly odvozeny podle [3] na základě měření a výpočtů. Tyto výrazy nebo diagram se použijí, společně se součinitelem q, také pro výpočet souměrného zkratového vypínacího proudu příspěvku od asynchronních motorů.*

Vypínací proud I_b příspěvku asynchronních motorů se odvozuje ze souměrného počátečního zkratového proudu I''_{kM} vynásobením součiniteli μ a q. Ve výrazech (5.26) se přitom namísto I''_{kG}/I_{rG} bere I''_{kM}/I_{rM}. Pro určení q jsou v normě opět výrazy i diagram, q může nabýt nanejvýš hodnotu 1:

$q = 1{,}03 + 0{,}12 \ln (P_{rM}/p)$; $q = 0{,}79 + 0{,}12 \ln (P_{rM}/p)$; $q = 0{,}57 + 0{,}12 \ln (P_{rM}/p)$; $q = 0{,}26 + 0{,}10 \ln (P_{rM}/p)$ pro $t_{min} = 0{,}02$ s pro $t_{min} = 0{,}05$ s pro $t_{min} = 0{,}10$ s pro $t_{min} \geq 0{,}25$ s P_{rM} je jmenovitý činný výkon v MW, p počet pólových dvojic motoru	**(5.27)**

Vypínací proudy určené pro zkratové příspěvky radiálně připojené do místa zkratu lze algebraicky sčítat.

V mřížové síti norma [2] povoluje použít pro **I_b při elektricky blízkém trojfázovém zkratu** hodnotu počátečního rázového zkratového proudu ($I_b = I''_k$), tedy stejnou hodnotu, jako pro zkrat elektricky vzdálený. Takto určené proudy jsou větší, než skutečný souměrný zkratový proud. Pro **přesnější výpočet** se mohou použít následující rovnice:

$\underline{I}_b = \underline{I}''_k - \sum_i \frac{\Delta \underline{U}_{Gi}}{c U_n/\sqrt{3}} (1 - \mu_i) \underline{I}''_{kGi} - \sum_j \frac{\Delta \underline{U}_{Mj}}{c U_n/\sqrt{3}} (1 - \mu_j q_j) \underline{I}''_{kMj}$; $\Delta \underline{U}_{Gi} = \mathrm{j}\, X''_{diK}\, \underline{I}''_{kGi}$; $\Delta \underline{U}_{Mj} = \mathrm{j}\, X''_{Mj}\, \underline{I}''_{kMj}$ Hodnoty $\underline{I}''_{kGi}$, $\Delta \underline{U}_{Gi}$, $\underline{I}''_{kMj}$ a $\Delta \underline{U}_{Mj}$ jsou měřeny na svorkách stroje a jsou vztaženy na stejné napětí. Pro. $\mu_i = 1$ se bere $(1 - \mu_i q_i) = 0$, nezávisle na hodnotě q_i.	**(5.28)**

Při nesouměrných elektricky blízkých zkratech se neuvažuje pokles souměrné složky zkratového proudu, použijí se rovnice (5.24).

Stejnosměrná složka zkratového proudu $i_{d.c.}$

Uvažuje se průběh stejnosměrné složky zkratového proudu zanikající s časovou konstantou R/L=2πfR/X:

$i_{d.c.} = \sqrt{2} I''_k e^{-2\pi f . t . R/X}$	**(5.29)**

***Poznámka**: Obvykle se určuje hodnota, kterou nabývá stejnosměrná složka zkratového proudu v čase t_{min}, tedy velikost **stejnosměrné složky vypínacího zkratového proudu**. Norma [2] tento parametr nezavádí a popis a symbolika v jejím čl. 4.4. mohou být proto poněkud zavádějící.*

Při určování poměru R/X se berou **skutečné rezistance strojů, nikoliv tedy rezistance fiktivní**. U mřížových sítí se použije metoda a) (jednotný poměr R/X) nebo c) (ekvivalentní kmitočet f_c). V závislosti na součinu $f.t_{min}$ se použije

$f_c/f = 0{,}27$ pro $f.t_{min} < 1$, $f_c/f = 0{,}15$ pro $f.t_{min} < 2{,}5$,

$f_c/f = 0{,}092$ pro $f.t_{min} < 5$ a $f_c/f = 0{,}055$ pro $f.t_{min} < 12{,}5$.

Ustálený zkratový proud I_k

***Poznámka**: Výpočet velikosti ustáleného zkratového proudu je v praxi požadován méně často, zřejmě pouze pro kontrolu a nastavení elektrických ochran, znalost poměru I''_k / I_k je však potřeba pro stanovení ekvivalentního oteplovacího proudu I_{th}. Norma [2] upozorňuje, že výpočet I_k je méně přesný než výpočet počátečního rázového zkratového proudu I''_k, v případě zkratu na vývodu generátoru nebo elektrárenského bloku závisí I_k též na systému buzení, napěťové regulaci, vlivu sycení apod. Synchronní stroje se závislými statickými budiči při zkratu na svorkách stroje k ustálenému zkratovému proudu nepřispívají, jejich příspěvek se však uvažuje v případě, že je mezi strojem a místem zkratu vložena impedance, například blokový transformátor.*

Ustálený zkratový **proud příspěvku synchronního stroje** radiálně připojeného **do místa trojfázového zkratu** se odvozuje ze jmenovitého proudu stroje:

$$I_{kmax} = \lambda_{max} I_{rG} \quad ; \quad I_{kmin} = \lambda_{min} I_{rG} \qquad \textbf{(5.30)}$$

Hodnoty součinitelů λ_{max} a λ_{min} lze v normě [2] odečíst z diagramů, výrazy pro jejich výpočet jsou v technické zprávě [3] . Závisí na poměru I_{kG}/I_{rG} a synchronní reaktanci x_{dsat} a jsou udány pro stroje s hladkým rotorem pro maximální budící proud = (1,3 nebo 1,6) x budící proud při jmenovitém zatížení a pro stroje s vyniklými póly pro maximální budící proud = (1,6 nebo 2,0) x budící proud při jmenovitém zatížení.

V případě trojfázového zkratu je **příspěvek asynchronního motoru** do ustáleného zkratového proudu nulový, **příspěvek síťového napáječe** $I_k = I''_k$. Jednotlivé příspěvky radiálně připojených zdrojů se mohou algebraicky sečíst. **V mřížové síti** se bere $I_{kmax} = I''_{kmax\cancel{M}}$ (= maximální počáteční rázový zkratový proud bez příspěvku asynchronních motorů) a $I_{kmin} = I''_{kmin}$.

V případě nesouměrných zkratů se neuvažuje pokles střídavé složky zkratového proudu a lze použít rovnice:

$$I_{k1} = I''_{k1} \quad ; \quad I_{k2} = I''_{k2} \quad ; \quad I_{k2E} = I''_{k2E} \quad ; \quad I_{kE2E} = I''_{kE2E} \qquad \textbf{(5.31)}$$

Ekvivalentní oteplovací zkratový proud I_{th}

Poznámka: Výpočtem ekvivalentního oteplovacího proudu se původně zabývala norma IEC 865. Do normy pro výpočet zkratových proudů byl tento výpočet včleněn až v normě IEC 60909:2001, se kterou je norma [2] *identická.*

Je definován jako efektivní hodnota proudu, který má při stejné době trvání stejné tepelné účinky jako má skutečný zkratový proud, který může obsahovat stejnosměrnou složku a s časem se mění.

Energii tepla vytvořeného průchodem zkratového proudu i(t) po dobu T_K obvodem s rezistancí charakterizuje Jouleův integrál, kterým je také definován ekvivalentní oteplovací proud I_{th} . Pro stanovení tohoto parametru z počátečního rázového zkratového proudu I''_k se používají součinitele m a n:

$$\int_0^{T_K} i^2 \mathrm{d}t = I_{th}^2 T_K \quad ; \quad I_{th} = I''_k \sqrt{m + n} \qquad \textbf{(5.32)}$$

Při udávání ekvivalentního oteplovacího proudu by měla být uvedena doba T_K (není-li uvedena, předpokládá se, že $T_K = 1$ s).

V normě [2] jsou diagramy i rovnice pro stanovení součinitelů m a n, Odvození rovnic a parametry typového generátoru, pro který byly diagramy vypracovány, jsou v technické zprávě [3] . Součinitel m odpovídá průběhu stejnosměrné složky zkratového proudu a je vynesen v závislosti na součiniteli nárazového zkratového proudu κ a součinu $f.T_k$ (platí pro 50 i 60 Hz), součinitel n pak odpovídá průběhu střídavé složky zkratového proudu a je vynesen v závislosti na poměru I''_k / I_k a době trvání zkratu T_k..

V trojfázových soustavách je pro stanovení ekvivalentního oteplovacího proudu I_{th} rozhodující **trojfázový zkratový proud**. Pokud je třeba určit I_{th} **pro nesouměrný zkrat**, vychází se z hodnot příslušného rázového souměrného zkratového proudu I''_{k1}, I''_{k2}, I''_{k2E} a I''_{kE2E} . Pro distribuční sítě (elektricky vzdálené zkraty) lze obvykle použít $n = 1$. U vzdálených zkratů s dobou trvání zkratu $T_k \geq 0{,}5$ s lze brát $m + n = 1$.

***Poznámka**: Ve výpočtu ekvivalentního oteplovacího zkratového proudu I_{th} jsou tedy zahrnuty i asynchronní motory, podílející se na velikosti počátečního rázového zkratového proudu I''_k . Postup podle normy ovšem neumožňuje určit ekvivalentní oteplovací proud samostatného příspěvku asynchronních motorů, pro který platí $I_k = 0$.*

Zkraty na straně nízkého napětí transformátorů, pokud je jeden vodič na straně vyššího napětí přerušen

***Poznámka**: Tento specifický případ zkratu byl doplněn až do normy IEC 60909:2001, jako článek 4.6.5. Tuzemská praxe provozování a chránění transformátorů vn/nn je odlišná, uvedené vztahy, mající význam pouze pro stanovení minimálního zkratového proudu, proto zřejmě nebudou v podmínkách ČR využívány*

Literatura

[1] Anderson, Fouad: Power System Control and Stability. Revised Printing, IEEE Press, New York

[2] ČSN EN 60909-0 (33 3022):2002, Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách – Část 0: Výpočet proudů

[3] ČSN 33 3022-1:2004, Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách – Část 1: Součinitele pro výpočet zkratových proudů podle IEC 60909-0

[4] ČSN IEC 909-2:1997 (33 3024), Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách – Část 2: Data pro výpočty zkratových proudů podle IEC 60909-0

[5] IEC/TR 60909-2: Edition 2.0: 2008-11, Technical report. Short-circuit currents in three-phase a.c. systems – Part 2: Data of electrical equipment for short-circuit current calculations

[6] ČSN EN 60909-3 (33 3022):2010: ed. 2, Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách – Část 3: Proudy během dvou nesoumístných současných jednofázových zkratů a příspěvky zkratových proudů tekoucích zemí

[7] IEC/TR 60909-4: First edition: 2000-07, Technical report. Short-circuit currents in three-phase a.c. systems – Part 4: Examples for the calculation of short-circuit currents

[8] ČSN EN 60865-1 (33 3040):1997, Zkratové proudy – Výpočet účinků – Část1: Definice a výpočetní metody

[9] ČSN EN 61660-1 (33 3025):1999, Zkratové proudy ve stejnosměrných rozvodech vlastní spotřeby v elektrárnách a rozvodnách – Část 1: Výpočet zkratových proudů

[10] ČSN EN 61660-2 (33 3026):1999, Zkratové proudy ve stejnosměrných rozvodech vlastní spotřeby v elektrárnách a rozvodnách – Část 2: Výpočet účinků

[11] ČSN IEC 61660-3 (33 3025):2002, Zkratové proudy ve stejnosměrných rozvodech vlastní spotřeby v elektrárnách a rozvodnách – Část 3: Příklady výpočtů

[12] Zkraty podle standardů ČSN a IEC. Sborník přednášek (Vokál, Roškota, Žejdlík). H.V.K.L.Propag team Trutnov, Trutnov 1996

[13] ČSN 33 3020: 1992, Výpočet poměrů při zkratech v trojfázové elektrizační soustavě

[14] R.Rjudenberg: Expluatacionnyje režimy elektroenergetičnych ustanovok, Leningrad, 1981 (Překlad z R.Rüdenberg: Elektrische schaltvorgange, Springer-Verlag Berlin-Heidelberg-New York, 1974

Děkuji za výdrž a porozumění