

Poruchové stavy v elektrizační soustavě

Při přenosu a rozvodu elektrické energie se mohou vyskytovat jevy (poruchové stavy) , které ohrožují bezpečnost provozu.

V provozu elektrizační soustavy se mohou vyskytnout následující poruchové stavy :

Zkrat:

Je to vzájemné spojení dvou nebo tří fází, popřípadě spojení jedné fáze se zemí v síti s přímo uzemněným uzlem. Proud procházející vedením při zkratu dosahuje několikanásobku jmenovitého proudu.

Důsledky vzniku zkratu:

- zvýšené tepelné i silové namáhání elektrického vedení, spotřebičů i ostatních rozvodných zařízení
- pokles napětí nepřímo úměrný elektrické vzdálenosti od místa zkratu
- odlehčení stroje (vznik urychlujícího výkonu), může dojít ke ztrátě stability

Zkrat může být způsoben únavou izolace, vlivem počasí, mechanickým poškozením, špatnou manipulací.

Zemní spojení:

Je to galvanické spojení jedné fáze se zemí v síti s izolovaným uzlem, popřípadě v síti s nepřímo uzemněným uzlem (uzel uzemněn přes odpor) nebo v síti s kompenzovaným uzlem (uzel uzemněn přes proměnnou tlumivku).

Důsledky vzniku zemního spojení:

- při přerušovaném zemním spojení (uhasínání oblouku v nule proudu a následné zapalování oblouku při rychlém nárůstu zotaveného napětí) vznik nebezpečných přepětí
- velká pravděpodobnost vzniku následného zkratu

Přetížení:

Je to zatěžování vodičů, elektrických zařízení a elektrických spotřebičů proudem přesahujícím hodnotu jmenovitého proudu.

Důsledky vzniku přetížení:

- zvýšené tepelné namáhání elektrického vedení, spotřebičů i ostatních rozvodných zařízení
- urychlení stárnutí izolace

Krátkodobá přetížení nemusí být nebezpečná, naopak dlouhodobá přetížení jsou nebezpečná téměř vždy.

Přepětí:

Podle způsobu vzniku je dělíme na atmosférická a provozní.

Atmosférická přepětí vznikají:

- přímým úderem blesku do vedení nebo do nekrytých částí elektrických zařízení
- indukci při úderu blesku v blízkosti vodičů nebo jiných částí rozvodného zařízení

Provozní přepětí jsou způsobena spínacími pochody v obvodech s velkými indukčnostmi nebo kapacitami.

Důsledky vzniku přepětí:

- způsobuje poškození a stárnutí izolace
- přidavné ztráty
- zvýšené nebezpečí vzniku zkratu

Podpětí:

Při konstantním odebíraném výkonu dochází v důsledku podpětí k proudovému přetížení. Podpětí může být způsobeno nedostatečnou kompenzací, přetížením nebo poruchou regulace napětí.

Důsledky vzniku podpětí: - vznik proudového přetížení

Nesouměrné zatížení:

Je to provozní stav, při kterém jsou jednotlivé fáze statoru alternátoru (motoru) zatěžovány různým proudem. V důsledku toho vzniká zpětná složka proudu i_2 , která vytváří magnetické pole otáčející se dvojnásobnou úhlovou rychlostí rotoru (v opačném smyslu). V rotoru se indukují vířivé proudy, jejich průchodem se může rotor nebezpečně zahřívat.

Nesouměrnost zatížení může být způsobena přerušením některé fáze nebo nesouměrností zátěže.

Důsledky vzniku nesouměrného zatížení: - lokální přehřívání rotoru

Zvýšení kmitočtu:

Bývá způsobeno poruchou regulace výkonu.

Důsledky zvýšení kmitočtu: - působí mechanicky na chráněné zařízení i na připojené stroje

Snížení kmitočtu:

Dochází k němu přetížením zdrojů energie v síti.

Důsledky snížení kmitočtu: - zvětšení magnetizačních proudů, tím zvětšení ztrát a oteplení

Zpětný tok výkonu:

Je způsoben ztrátou výkonu pohonu nebo špatnou energetickou bilancí sítě.

Důsledky zpětného toku výkonu:

- přenos energie z generátoru do turbíny nebo z motoru do sítě, čímž může dojít k poškození mechanického stroje

Teoretický rozbor zkratových jevů

Mezi nejčastější příčiny vzniku elektromagnetických přechodných jevů v elektrizační soustavě patří zkraty. Při zkratu prochází místem vzniku zkratu několikanásobně větší proud vzhledem k jmenovitým hodnotám. To je způsobeno výrazným snížením impedance zkratového obvodu. Obvod mezi místem zkratu a napěťovými zdroji nazýváme zkratovým obvodem. Kdyby jednotlivé části elektrického obvodu neměly žádný odpor, pak by zkratovým obvodem protékal podle Ohmova zákona nekonečně velký proud. V reálném zkratovém obvodu je však vždy nějaký odpor, který se skládá z vnitřních impedancí generátorů, transformátorů, z impedancí vedení, kabelů a z přechodových odporů jak na spojích, tak i v místě zkratu, takže zkratový proud dosáhne konečné velikosti.

Napětí v místě zkratu klesá na nepatrnou velikost, při dokonalém zkratu teoreticky až na nulu. Celé vnitřní napětí zdroje se tedy spotřebuje na úbytky napětí v alternátorech, venkovních popř. kabelových vedeních a dalších prvcích sítě.

Definice základních pojmů

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

Zkratový proud – je to nadproud, který vzniká v elektrizační soustavě v důsledku zkratu.

Předpokládaný zkratový proud – proud, který by protékal obvodem, kdyby byl zkrat nahrazen ideálním spojením se zanedbatelnou impedancí bez změny napájení.

Souměrný zkratový proud – efektivní hodnota střídavé souměrné složky předpokládaného zkratového proudu se zanedbatelnou eventuální aperiodickou složkou proudu.

Počáteční souměrný rázový zkratový proud I_k – efektivní hodnota střídavé souměrné složky předpokládaného zkratového proudu v okamžiku vzniku zkratu, při konstantní impedanci.

Stejnoseměrná (aperiodická) složka zkratového proudu i_{DC} – střední hodnota horní a dolní obálkové křivky průběhu zkratového proudu klesající ze své počáteční hodnoty k nule.

Nárazový zkratový proud i_p – maximální možná okamžitá hodnota předpokládaného zkratového proudu.

Souměrný vypínací zkratový proud I_b – efektivní hodnota úplné periody souměrné složky předpokládaného zkratového proudu v okamžiku oddělení kontaktů prvního pólu spínacího zařízení.

Ustálený zkratový proud I_k – efektivní hodnota zkratového proudu, který zůstává po odeznění přechodného jevu.

Ekvivalentní oteplovací zkratový proud I_{th} – efektivní hodnota proudu, který má stejné tepelné účinky a stejnou dobu trvání jako skutečný zkratový proud, který může obsahovat stejnosměrnou složku a s časem se měnit.

Jmenovité napětí sítě U_n – sdružené napětí, kterým je síť označena a k němuž se vztahují provozní charakteristiky.

Napěťový součinitel c – poměr mezi napětím ekvivalentního napěťového zdroje a jmenovitým napětím U_n děleným $\sqrt{3}$.

Počáteční souměrný rázový zkratový výkon S_k'' – Pomyslná hodnota definovaná jako součin počátečního souměrného rázového zkratového proudu I_k'' , jmenovitého napětí sítě U_n a součinitele $\sqrt{3}$.

$$S_k'' = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_k'' \quad (1)$$

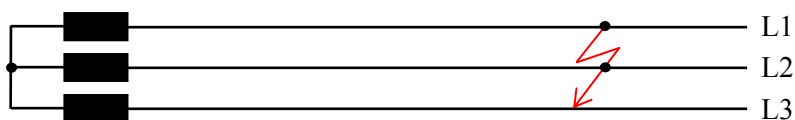
Elektricky vzdálený zkrat – zkrat, při kterém zůstává velikost souměrné složky předpokládaného zkratového proudu v podstatě konstantní.

Elektricky blízký zkrat – 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 asynchronního motoru překračuje 5 % počátečního souměrného rázového proudu I_k'' bez motoru.

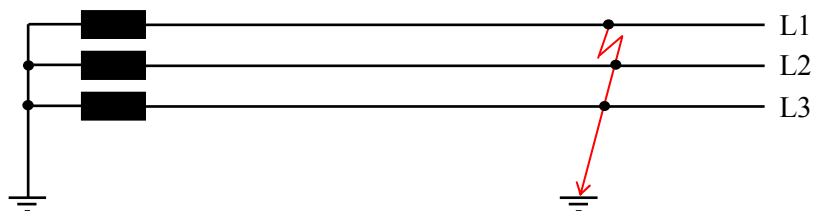
Druhy zkratů

Souměrný zkrat

- Trojpolový zkrat* nastane při spojení všech tří fází elektrizační soustavy v jednom místě. Všechny tři vodiče jsou stejně postiženy a vedou stejný zkratový proud. Tento druh zkratu se nejčastěji vyskytuje v kabelových sítích (oblouk, vzniklý při jakémkoli zkratu snadno poruší izolaci mezi všemi fázemi) a vede často k nejvyšším hodnotám předpokládaného zkratového proudu.

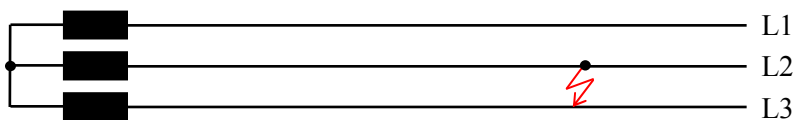


- Trojfázový zemní zkrat* nastává při spojení všech tří fází navzájem a jejich současným spojením se zemí.

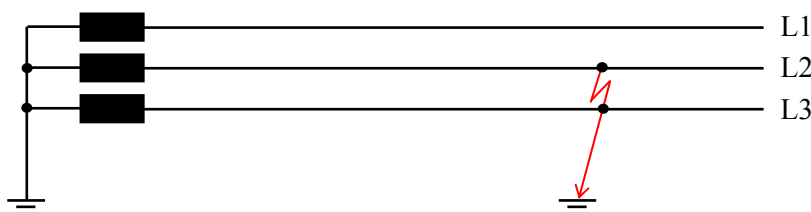


Nesouměrný zkrat

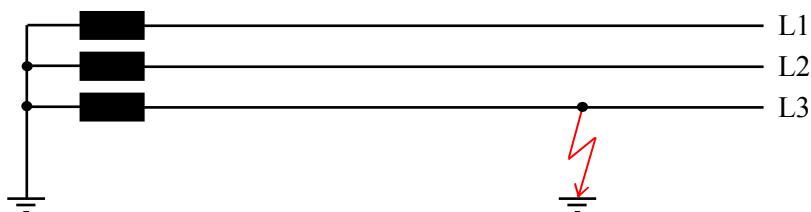
- *Dvojpolový zkrat* vzniká při spojení kterýchkoli dvou fází soustavy v jednom místě.



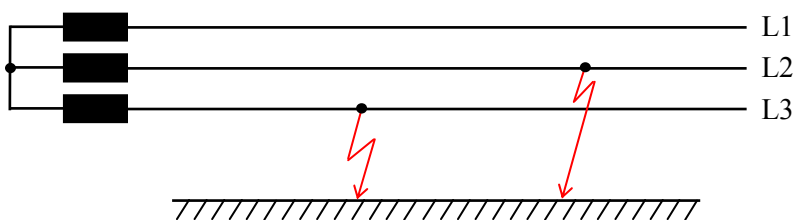
- *Dvojpolový zemní zkrat* vzniká, jsou-li dvě spojené fáze současně spojeny se zemí.



- *Jednofázový zkrat* vzniká při spojení jedné fáze se zemí v soustavě s uzemněným uzlem.



- *Simultánní zkrat* je zvláštní případ dvojfázového zemního zkratu, kdy dojde ke spojení dvou různých fází trojfázové soustavy se zemí na dvou různých místech.



Způsoby spojení částí s různým potenciálem

V místě zkratu vznikají přechodné odpory, jejichž velikost závisí na způsobu spojení fází či fáze se zemí.

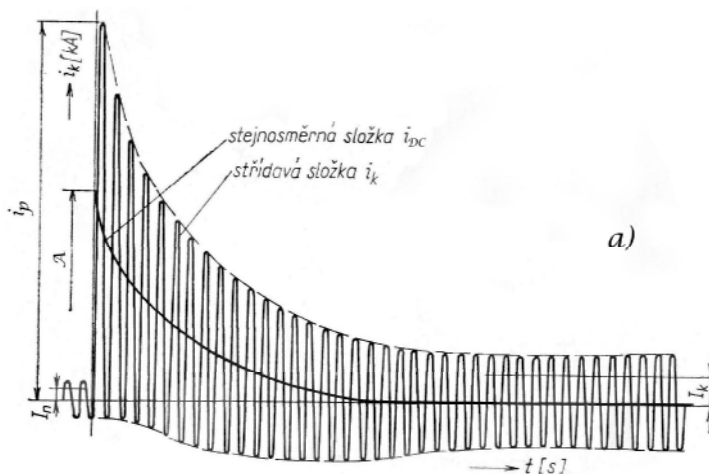
- *Dokonalý zkrat* vzniká dokonalým spojením fází (fáze a země), impedance v místě spojení je zanedbatelná. Bývá nejčastěji způsoben kovovým předmětem.

- *Nedokonalý zkrat* vzniká nedokonalým spojením částí s různými potenciály, impedance zkratového spojení je značná a má vliv na velikost zkratového proudu. Tento druh spojení způsobí např. větev stromu, která má určitý odpor.
- *Obloukový zkrat* vzniká spojením nebo přiblížením vodičů na přeskokovou vzdálenost, což má za následek snížení izolační pevnosti a vznik elektrického oblouku. Určení přesné velikosti odporu oblouku je velmi obtížné. Proud i délka oblouku se v průběhu zkratů mění, mění se tedy i jeho odpor.

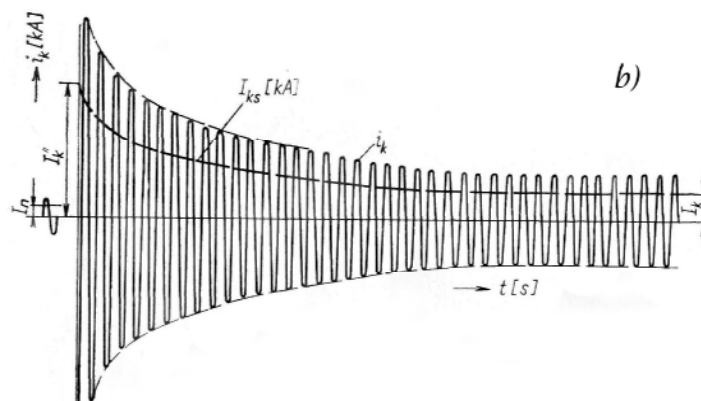
Průběh zkratového proudu

Při každém zkratu, bez ohledu na to co jej vyvolalo, se jedná o přechod z normálního stavu na stav poruchový, tj. z normálního pracovního proudu na ustálený zkratový proud. Tento přechod není skokový, je doprovázen přechodným dějem, který trvá určitou dobu. Po tuto dobu se průběh proudu mění nejen periodicky, ale v obvodu se vyskytují také vyrovnávací proudy, které tento přechod zprostředkují. Výsledný zkratový proud se skládá ze dvou hlavních složek:

- Stejnosměrná složka
- Střídavá složka



Obr. 2. Průběh nesouměrného zkratového proudu



Obr. 3. Průběh střídavé složky zkratového proudu

Stejnoseměrná složka i_{DC}

Zkratový proud se stejnosměrnou složkou nazýváme nesouměrný zkratový proud (viz obr. 2). Počáteční velikost stejnosměrné složky je různá. Závisí na okamžiku, ve kterém zkrat nastal. Průběh stejnosměrné složky s časem klesá, asi po 0,25 s zanikne. Zkratový proud bývá převážně indukčního charakteru, zpožďuje se tedy za napětím o 90° . Stejnoseměrná složka je tedy maximální, je-li napětí v okamžiku zkratu nejmenší.

V případě trojpolového zkratu jsou díky posunutí fázových napětí o 120° stejnosměrné složky v jednotlivých fázích různé, maximální stejnosměrná složka může být jen v jedné fázi.

Při výpočtech musíme uvažovat nejnepříznivější podmínky, a proto vždy počítáme s maximální stejnosměrnou složkou:

$$i_{DC} = \sqrt{2} \cdot I_k'' \cdot e^{-2\pi f t \frac{R}{X}} \quad (5)$$

kde

I_k'' je počáteční souměrný rázový zkratový proud;

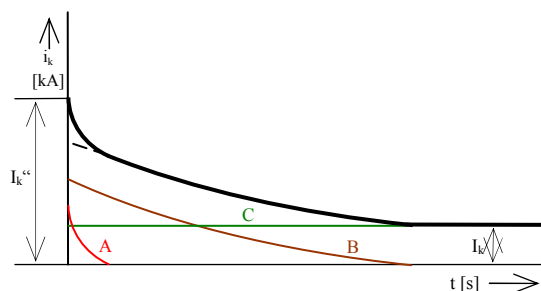
f jmenovitý kmitočet;

t doba trvání zkratu;

R/X poměr určíme podle přílohy 5a.

Střídavá složka i_k

Průběh střídavé složky je vyznačen na obr. 3. Proud i_k kmitá průmyslovým kmitočtem s postupně klesající amplitudou a je souměrný podle osy času, nazývá se proto souměrný zkratový proud. Má stejný průběh jako zkratový proud ve fázi, kde nevzniká stejnosměrná složka. Souměrný zkratový proud se obecně skládá ze tří složek. Na obr. 4. jsou vyznačeny jednotlivé složky, ze kterých se skládá průběh efektivní hodnoty souměrného zkratového proudu.



Obr. 4. Efektivní hodnota souměrného zkratového proudu

- A - rázová složka zkratového proudu;
- B - přechodná složka zkratového proudu;
- C - ustálená složka zkratového proudu.

Všechny tři složky mají sinusový průběh o kmitočtu soustavy. Složky A a B mají tendenci klesat podle exponenciály, přičemž složka C zůstává po celou dobu trvání zkratu konstantní.

S ohledem na účinky zkratových proudů na elektrické zařízení nás z průběhu zkratového proudu zajímají dále uvedené hodnoty, neboť jsou ve většině případů postačující pro dimenzování elektrických zařízení.

Počáteční souměrný rázový zkratový proud I_k''

Je to efektivní hodnota střídavé souměrné složky předpokládaného zkratového proudu v okamžiku vzniku zkratu při konstantní hodnotě impedance. Obecně jeho velikost určíme pomocí vztahu:

$$I_k'' = k_1 \cdot \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_k} \quad \text{nebo} \quad I_k'' = k_1 \cdot \frac{U_{\text{výp}}}{|Z_k|}$$

kde

- k_1 je součinitel rázového zkratového proudu;
- U_n výsledné výpočtové napětí sousledné složky;
- c napěťový součinitel;
- Z_k celková výpočtová impedance uvedená pro různé druhy zkratu.

Napěťový součinitel c

Jmenovité napětí U_n	Napěťový součinitel c pro výpočet	
	maximálních zkratových proudů c_{\max}	minimálních zkratových proudů c_{\min}
Nízké napětí 100 V až 1 000 V	1,05	0,95
Vysoké napětí 1 kV až 35 kV	1,10	1,00
Velmi vysoké napětí nad 35 kV		

Zkraty v trojfázové soustavě při chodu naprázdno

Uvažujme o jednoduché trojfázové soustavě se synchronním strojem jako zdroji napětí sousledné složkové soustavy. Zkratový obvod má impedanci složenou z impedance synchronního stroje a impedance vnější části obvodu.

Fázory napětí a proudů fází U, V, W v soustavě souměrných složek.

$$\begin{aligned}\hat{U}_{L_1} &= \hat{U}_{(0)} + \hat{U}_{(1)} + \hat{U}_{(2)} \\ \hat{U}_{L_2} &= \hat{U}_{(0)} + \hat{a}^2 \hat{U}_{(1)} + \hat{a} \hat{U}_{(2)} \\ \hat{U}_{L_3} &= \hat{U}_{(0)} + \hat{a} \hat{U}_{(1)} + \hat{a}^2 \hat{U}_{(2)}\end{aligned}\quad 2.1$$

$$\begin{aligned}\hat{I}_{L_1} &= \hat{I}_{(0)} + \hat{I}_{(1)} + \hat{I}_{(2)} \\ \hat{I}_{L_2} &= \hat{I}_{(0)} + \hat{a}^2 \hat{I}_{(1)} + \hat{a} \hat{I}_{(2)} \\ \hat{I}_{L_3} &= \hat{I}_{(0)} + \hat{a} \hat{I}_{(1)} + \hat{a}^2 \hat{I}_{(2)}\end{aligned}\quad 2.2$$

Indexy: (0), (1), (2) označují netočivou, souslednou a zpětnou složku složkové soustavy.

Jednotkové fázory natočení jsou:

$$\begin{aligned}\hat{a} &= -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{2\pi}{3} \\ \hat{a}^2 &= -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} = -\frac{2\pi}{3} \\ 1 + \hat{a}^2 + \hat{a} &= 0\end{aligned}$$

Souměrné složky vnitřního napětí alternátoru označme $\vec{U}_{i1}, \vec{U}_{i2}, \vec{U}_{i0}$, souměrné složky napětí v místě zkratu $\vec{U}_1, \vec{U}_2, \vec{U}_0$ a složkové proudy $\vec{I}_1, \vec{I}_2, \vec{I}_0$

Pak platí že:

$$\vec{U}_{i(1)} = \hat{Z}_{(1)}\vec{I}_{(1)} + \vec{U}_{(1)}$$

$$\vec{U}_{i(2)} = \hat{Z}_{(2)}\vec{I}_{(2)} + \vec{U}_{(2)}$$

$$\vec{U}_{i(0)} = \hat{Z}_{(0)}\vec{I}_{(0)} + \vec{U}_{(0)}$$

Alternátor je vždy zdrojem sousledné složky napětí. pro chod alternátoru naprázdno platí:

$$\begin{aligned}\vec{U}_{i(1)} &= \vec{U}_1 = \vec{U}_f \\ \vec{U}_{i(2)} &= 0 \\ \vec{U}_{i(0)} &= 0\end{aligned}$$

Kde \vec{U}_f je fázor napětí na svorkách alternátoru a tudíž vyplývají základní rovnice složkových soustav:

$$\begin{aligned}\vec{U}_1 = \vec{U}_f &= \hat{Z}_{(1)}\vec{I}_{(1)} + \vec{U}_{(1)} \\ 0 &= \hat{Z}_{(2)}\vec{I}_{(2)} + \vec{U}_{(2)} \\ 0 &= \hat{Z}_{(0)}\vec{I}_{(0)} + \vec{U}_{(0)}\end{aligned}\quad 2.3$$

Z rovnic 2.3 vyplývá že:

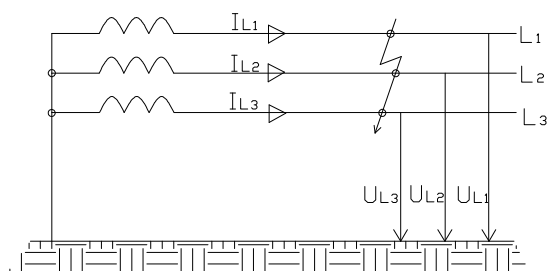
- zdrojem napětí sousledné složkové soustavy je alternátor.
- původcem proudů zpětné a netočivé složky soustavy je napěťová nesymetrie v místě poruchy (zkratu). V místě poruchy potřebujeme určit velikost napětí a proudů jednotlivých složek složkové soustavy, proto se uvedené tři rovnice (2.3) doplňují dalšími třemi podle typu zkratu.

Druhy zkratů

Souměrný zkrat

Jediným souměrným zkratem je trojfázový (obr. 4). Může nastat při kovovém spojení všech tří fází navzájem. Všechny tři fáze jsou shodně postiženy a vedou stejný zkratový proud, často vede k nejvyšším hodnotám předpokládaného zkratového proudu. Nejčastěji se vyskytuje u kabelových sítí.

1.1.1. Trojfázový zkrat



Pro tento typ zkratu platí tři rovnice:

$$\bar{U}_{L_1} = \bar{U}_{L_2} = \bar{U}_{L_3} = 0$$

z toho vyplývá podle 2.1

$$\bar{U}_{L_1} = \bar{U}_{(0)} + \bar{U}_{(1)} + \bar{U}_{(2)} = 0$$

$$\bar{U}_{L_2} = \bar{U}_{(0)} + \hat{a}^2 \bar{U}_{(1)} + \hat{a} \bar{U}_{(2)} = 0$$

$$\bar{U}_{L_3} = \bar{U}_{(0)} + \hat{a} \bar{U}_{(1)} + \hat{a}^2 \bar{U}_{(2)} = 0$$

Součtem těchto rovnic dostáváme $\bar{U}_{(0)} = 0$, při uvažování této hodnoty u odečítání druhé rovnice od první dostáváme:

$$\bar{U}_{(0)} = \bar{U}_{(1)} = \bar{U}_{(2)} = 0$$

dosazením do rovnice 2.3, při uvážení $\bar{U}_i = \bar{U}_f$ dostáváme:

$$\hat{I}_{(1)} = \frac{\bar{U}_f}{\hat{Z}_{(1)}} ; \hat{I}_{(2)} = 0 ; \hat{I}_{(0)} = 0$$

dosazením do rovnic 2.2 vyplývá:

$$\hat{I}_{L_1} = \frac{\bar{U}_f}{\hat{Z}_{(1)}} \quad \hat{I}_{L_2} = \hat{a}^2 \frac{\bar{U}_f}{\hat{Z}_{(1)}} \quad \hat{I}_{L_3} = \hat{a} \frac{\bar{U}_f}{\hat{Z}_{(1)}}$$

Z těchto rovnic vyplývá, že při trojfázovém zkratu se uplatní jen sousledná složka soustavy.

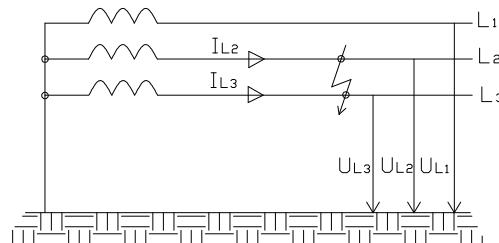
Nesouměrné zkraty

Dvoufázový zkrat – Vzniká při spojení dvou různých fází v sítích s izolovaným uzlem zdroje (IT), nebo v uzemněných sítích (TN;TT) spojením dvou fází bez kontaktu se zemí (obr.5).

Dvoufázový zkrat zemní – Vzniká spojením dvou fází a země v sítích s uzemněným uzlem zdroje (TN;TT) (obr.6).

Jednofázový zkrat – vzniká při spojení jedné fáze se zemí u sítí s uzemněným uzlem zdroje (TN;TT). Způsobuje největší rušení sdělovacích vedení (obr.7). U sítí s izolovaným uzlem zdroje (IT) se tato porucha nazývá zemní spojení.

1.1.2. Dvoufázový zkrat



platí zde:

$$\dot{U}_{L_2} = \dot{U}_{L_3} \Rightarrow \dot{U}_{L_2} - \dot{U}_{L_3} = 0$$

$$\dot{I}_{L_1} = 0 \quad ; \quad \dot{I}_{L_3} = -\dot{I}_{L_2}$$

dosazením do rovnic 2.2 dostáváme:

$$\dot{I}_{L_1} = 0 = \dot{I}_{(0)} + \dot{I}_{(1)} + \dot{I}_{(2)}$$

$$\dot{I}_{L_2} = \dot{I}_{(0)} + \dot{a}^2 \dot{I}_{(1)} + \dot{a} \dot{I}_{(2)}$$

$$\dot{I}_{L_3} = -\dot{I}_{L_2} = \dot{I}_{(0)} + \dot{a} \dot{I}_{(1)} + \dot{a}^2 \dot{I}_{(2)}$$

Sečtením těchto rovnic zjistíme, že $\dot{I}_{(0)} = 0$, a z první rovnice poté plyne $\dot{I}_{(1)} = -\dot{I}_{(2)}$.

Netočivá složka proudu u tohoto zkratu neexistuje, neboť se musí uzavírat čtvrtým vodičem nebo zemí.

Z rovnice 2.1 vychází také $\dot{U}_{(0)} = 0$ a dále:

$$\dot{U}_{L_2} - \dot{U}_{L_3} = 0 = (\dot{a}^2 - \dot{a})\dot{U}_{(1)} + (\dot{a} - \dot{a}^2)\dot{U}_{(2)} \Rightarrow \dot{U}_{(1)} = \dot{U}_{(2)}$$

dosazením do základních rovnic 2.3

$$\dot{U}_i = \dot{Z}_{(1)} \dot{I}_{(1)} + \dot{U}_{(1)}$$

$$0 = -\dot{Z}_{(2)} \dot{I}_{(1)} + \dot{U}_{(1)}$$

$$0 = 0$$

a odečtením dostaneme:

$$\hat{U}_i = (\hat{Z}_{(1)} + \hat{Z}_{(2)})\hat{I}_{(1)}$$

odtud:

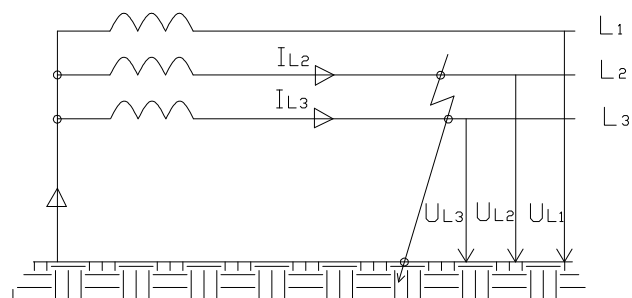
$$\hat{I}_{(1)} = -\hat{I}_{(2)} = \frac{\hat{U}_i}{\hat{Z}_{(1)} + \hat{Z}_{(2)}}$$

zkratový proud např. ve fázi L₃ o $\vec{U}_i = \vec{U}_f$:

$$\vec{I}_{L_3} = \hat{a}\hat{I}_{(1)} + \hat{a}^2\hat{I}_{(2)} = (\hat{a} - \hat{a}^2)\hat{I}_{(1)} = j \frac{\sqrt{3}\hat{U}_f}{\hat{Z}_{(1)} + \hat{Z}_{(2)}}$$

Při dvoufázovém zkratu izolovaném musíme zjistit souslednou a zpětnou složkovou impedanci.

1.1.3. Dvoufázový zkrat zemní



Platí:

$$\vec{U}_{L_2} = \vec{U}_{L_3} = 0 ; \quad \vec{I}_{L_1} = 0$$

z rovnic 2.1 a 2.2 vyplývá:

$$\vec{I}_{L_1} = \vec{I}_{(0)} + \vec{I}_{(1)} + \vec{I}_{(2)} = 0 \Rightarrow \vec{I}_{(0)} = -(\vec{I}_{(1)} + \vec{I}_{(2)})$$

$$\vec{U}_{L_2} - \vec{U}_{L_3} = 0 = (\hat{a}^2 - \hat{a})\vec{U}_{(1)} + (\hat{a} - \hat{a}^2)\vec{U}_{(2)} \Rightarrow \vec{U}_{(1)} = \vec{U}_{(2)}$$

$$\vec{U}_{L_2} = 0 = \vec{U}_{(0)} + \hat{a}^2\vec{U}_{(1)} + \hat{a}\vec{U}_{(2)} = (\hat{a}^2 + \hat{a})\vec{U}_{(1)} + \vec{U}_{(0)} = -\vec{U}_{(1)} + \vec{U}_{(0)} \Rightarrow \vec{U}_{(1)} = \vec{U}_{(0)}$$

základní rovnice 2.3 pak vypadají takto:

$$\vec{U}_i = \hat{Z}_{(1)}\hat{I}_{(1)} + \vec{U}_{(0)}$$

$$0 = \hat{Z}_{(2)}\hat{I}_{(2)} + \vec{U}_{(0)}$$

2.4

$$0 = -\hat{Z}_{(0)}(\hat{I}_{(1)} + \hat{I}_{(2)}) + \vec{U}_{(0)}$$

první rovnici dělíme $\hat{Y}_{(1)} = \hat{Z}_{(1)}^{-1}$.

druhou rovnici dělíme $\hat{Y}_{(2)} = \hat{Z}_{(2)}^{-1}$.

třetí rovnici dělíme $\hat{Y}_{(0)} = \hat{Z}_{(0)}^{-1}$

sečtením všech tří rovnic, dostáváme:

$$\tilde{U}_i \hat{Y}_{(1)} = (\hat{Y}_{(1)} + \hat{Y}_{(2)} + \hat{Y}_{(0)}) \tilde{U}_{(0)}$$

přítom:

$$\tilde{U}_{(0)} = \frac{Y_{(1)}}{(\hat{Y}_{(1)} + \hat{Y}_{(2)} + \hat{Y}_{(0)})} \tilde{U}_i$$

Nyní můžeme určit jednotlivé složkové proudy po dosazení \tilde{U}_0 do rovnic 2.4:

$$\hat{I}_{(1)} = \hat{Y}_{(1)} (\tilde{U}_i - \tilde{U}_{(0)}) = \hat{Y}_{(1)} \frac{(\hat{Y}_{(2)} + \hat{Y}_{(0)})}{(\hat{Y}_{(1)} + \hat{Y}_{(2)} + \hat{Y}_{(0)})} \tilde{U}_i$$

$$\hat{I}_{(2)} = -\hat{Y}_{(2)} \tilde{U}_{(0)} = -\frac{Y_{(2)} Y_{(1)}}{(\hat{Y}_{(1)} + \hat{Y}_{(2)} + \hat{Y}_{(0)})} \tilde{U}_i$$

$$\hat{I}_{(0)} = -\hat{Y}_{(0)} \tilde{U}_{(0)} = -\frac{Y_{(0)} Y_{(1)}}{(\hat{Y}_{(1)} + \hat{Y}_{(2)} + \hat{Y}_{(0)})} \tilde{U}_i$$

Stanovíme hledané proudy ve fázích L_2 a L_3 užitím rovnice 2.2:

$$\tilde{I}_{L_2} = \tilde{I}_{(0)} + \hat{a}^2 \tilde{I}_{(1)} + \hat{a} \tilde{I}_{(2)}$$

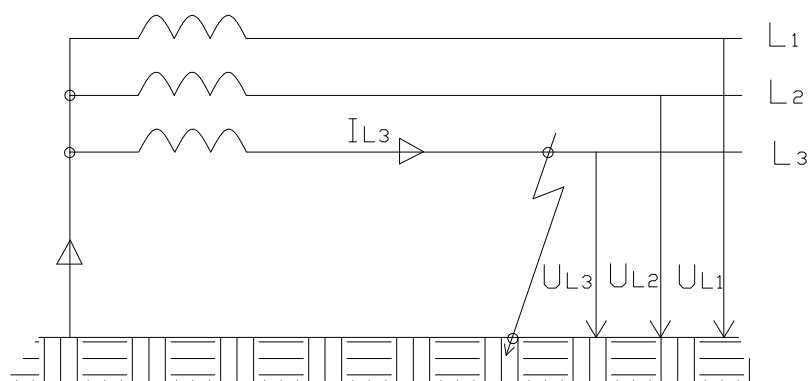
$$\tilde{I}_{L_3} = \tilde{I}_{(0)} + \hat{a} \tilde{I}_{(1)} + \hat{a}^2 \tilde{I}_{(2)}$$

Proud tekoucí zemí je roven součtu proudů $\tilde{I}_{L_2} + \tilde{I}_{L_3}$:

$$(\tilde{I}_{L_2} + \tilde{I}_{L_3}) = 2\tilde{I}_{(0)} + (\hat{a}^2 + \hat{a})\tilde{I}_{(1)} + (\hat{a} + \hat{a}^2)\tilde{I}_{(2)} = 2\tilde{I}_{(0)} - (\tilde{I}_{(1)} + \tilde{I}_{(2)}) = 3\tilde{I}_{(0)}$$

1.1.4.

Jednofázový zkrat



Pro jednofázový zkrat jsou základní tři rovnice:

$$\vec{U}_{L_3} = 0 ; \vec{I}_{L_1} = \vec{I}_{L_2} = 0$$

podle rovnic 2.1 a 2.2 jsou fázory napětí a proudů v místě zkratu:

$$\vec{U}_{L_3} = \vec{U}_{(0)} + \vec{U}_{(1)} + \vec{U}_{(2)} = 0$$

$$\vec{I}_{L_1} = \vec{I}_{(0)} + \hat{a}^2 \vec{I}_{(1)} + \hat{a} \vec{I}_{(2)} = 0$$

2.5

$$\vec{I}_{L_2} = \vec{I}_{(0)} + \hat{a} \vec{I}_{(1)} + \hat{a}^2 \vec{I}_{(2)} = 0$$

odečtením rovnic proudů od sebe dostaneme:

$$(\hat{a} - \hat{a}^2) \vec{I}_{(1)} + (\hat{a}^2 - \hat{a}) \vec{I}_{(2)} = 0$$

z toho vyplývá, že $\vec{I}_{(1)} = \vec{I}_{(2)}$.

Dosadíme toto do rovnice pro \vec{I}_V vyjde nám $\vec{I}_{(0)} = \vec{I}_{(1)} = \vec{I}_{(2)}$.

Dosazením do základních rovnic 2.3 dostaneme:

$$\vec{U}_i = \hat{Z}_{(1)} \vec{I}_{(1)} + \vec{U}_{(1)}$$

$$0 = \hat{Z}_{(2)} \vec{I}_{(1)} + \vec{U}_{(2)}$$

$$0 = \hat{Z}_{(0)} \vec{I}_{(1)} + \vec{U}_{(0)}$$

Sečtením těchto rovnic a použití rovnic 2.5:

$$\vec{U}_i = (\hat{Z}_{(1)} + \hat{Z}_{(2)} + \hat{Z}_{(0)}) \vec{I}_{(1)}$$

odtud:

$$\vec{I}_{(0)} = \vec{I}_{(1)} = \vec{I}_{(2)} = \frac{\vec{U}_i}{(\hat{Z}_{(1)} + \hat{Z}_{(2)} + \hat{Z}_{(0)})}$$

Zkratový proud ve fázi L_3 pokud $\vec{U}_i = \vec{U}_f$:

$$\vec{I}_{L_3} = \vec{I}_{(0)} + \vec{I}_{(1)} + \vec{I}_{(2)} = \frac{3\vec{U}_f}{(\hat{Z}_{(1)} + \hat{Z}_{(2)} + \hat{Z}_{(0)})}$$

U jednofázového zkratu je třeba určit všechny tři složkové impedance.

Ekvivalence nesouměrných zkratů se zkratem souměrným (trojfázovým)

Trojfázový zkrat

$$\hat{I}_{(1)k} = \frac{\hat{U}_i}{\hat{Z}_{(1)}}$$

Dvoufázový zkrat

$$\hat{I}_{(1)k2} = \frac{\hat{U}_i}{\hat{Z}_{(1)} + \hat{Z}_{(2)}}$$

Dvoufázový zkrat zemní

$$\hat{I}_{(1)k2E} = \frac{\hat{U}_i}{\hat{Z}_{(1)} + \frac{\hat{Z}_{(2)}\hat{Z}_{(0)}}{\hat{Z}_{(2)} + \hat{Z}_{(0)}}}$$

Jednofázový zkrat

$$\hat{I}_{(1)k1} = \frac{\hat{U}_i}{\hat{Z}_{(1)} + \hat{Z}_{(2)} + \hat{Z}_{(0)}}$$

Výpočet zkratových proudů

Při výpočtu zkratových proudů je nutný určitý postup, při kterém se v uvedeném sledu provedou tyto základní úkony:

- stanovit impedance (reaktance, činné odpory) jednotlivých prvků zkratového obvodu
- sestavit náhradní schéma, postupně zjednodušit, určit výslednou impedanci zkratového obvodu
- výpočet zkratového proudu

Asynchronní motory

Příspěvek jednofázových motorů se uvažuje, jen tehdy je-li jejich součtový výkon roven 15% součtového výkonu trojfázových asynchronních motorů.

Příspěvek motorů opatřených polovodičovými měniči se uvažuje jen k počátečnímu rázovému a nárazovému zkratovému proudu, když měnič dovolí rekuperaci energie.

Příspěvek asynchronních motorů v nízkonapěťové soustavě ke zkratovému proudu I_K'' se může zanedbat, jestliže tento příspěvek není větší než 5% počátečního zkratového proudu I_{KM}'' , vypočítaného bez příspěvku těchto motorů.

Dále se s příspěvkem asynchronních motorů nepočítá ve veřejné distribuční síti nízkého napětí.

Podmínky pro stanovení maximálního zkratového proudu

Při určování nejvyšší možné hodnoty zkratového proudu se vychází z nejnepriznivějšího stavu elektrizační soustavy.

Předpokládá se:

- a) Pro výpočet maximálních zkratových proudů se musí použít napěťový součinitel c_{\max}
- b) Vybrat konfiguraci soustavy a maximální příspěvky z elektráren a síťových napáječů tak, aby vedly k maximální hodnotě zkratového proudu v místě zkratu.
- c) Vliv asynchronních motorů se musí uvážit podle potřeby, ale v souladu s 2.6.1.
- d) Uvažují se odpory R_L vedení (venkovních vedení a kabelů) při teplotě 20°C.

Podmínky pro stanovení minimálního zkratového proudu

Při určování nejmenší možné velikosti zkratového proudu se vychází z omezeného stavu elektrizační soustavy.

Předpokládá se:

- a) Pro výpočet se musí použít napěťový součinitel c_{\min} .
- b) Vybrat konfiguraci soustavy a minimální příspěvky z elektráren a síťových napáječů tak, aby vedly k minimální velikosti zkratového proudu.
- c) U stanic, které jsou za normálního provozu napájené dvěma transformátory nebo dvěma vedeními, se minimální zkratové proudy určí při odpojení jednoho transformátoru nebo vedení.
- d) Vliv asynchronních motorů se zanedbává.
- e) Odpor R_L venkovního vedení nebo kabelů se musí uvažovat při nejvyšší teplotě

Počáteční souměrný rázový zkratový proud I_k'' se určí pomocí vztahu:

$$I_k'' = k_1 \cdot \frac{U_{výp}}{|Z_k|}$$

kde k_1 je součinitel poč. souměr. rázového zkratového proudu

$U_{výp}$ výsledné výpočtové napětí sousledné složky [kV]

Z_k celková výpočtová impedance uvedená pro různé druhy zkratů v tabulce 1

Tabulka 1: Velikost výpočtové impedance pro různé zkraty [Ω]

Druh zkratu	k_1	$Z_k [\Omega]$	
trojfázový	1	$Z_{(1)}$	
jednofázový	3	v trojfázovém rozvodu	$Z_{(1)} + Z_{(2)} + Z_{(0)}$
		na jednofázovém vývodu o impedanci Z_{1f}	$Z_{(1)} + Z_{(2)} + Z_{(0)} + 3Z_{1f}$
dvoufázový	$\sqrt{3}$	$Z_{(1)} + Z_{(2)}$	
dvoufázový zemní	$\sqrt{3}$	$\frac{Z_{(1)} + Z_{(0)} + Z_{(1)} \cdot Z_{(0)} / Z_{(2)}}{-\frac{\sqrt{3}}{2} \pm j \left[\frac{1}{2} + \frac{Z_{(0)}}{Z_{(1)}} \right]}$ pro proud v postižených vodičích	
	3	$Z_{(1)} + Z_{(0)} + \frac{Z_{(1)} \cdot Z_{(0)}}{Z_{(2)}}$ pro proud procházející do země	

1.1.5. Zkratové impedance elektrického zařízení

Zkratový proud můžeme počítat z parametrů prvků jejichž hodnota je udána v poměrných hodnotách. Zde však musíme vhodně zvolit vztažný výkon.

Vzorce pro výpočet hodnot prvků udaných v poměrných jednotkách:

Soustava:

$$z_{(I)} = \frac{c \cdot I_V}{I_k''} = \frac{c \cdot S_V}{S_k} \quad (-; -, kA, kA, MVA, MVA)$$

Alternátor:

$$x_{(I)} = \frac{x_d'' \cdot S_V}{100 \cdot S_{nG}} \quad (-; \%, MVA, MVA)$$

Reaktor:

$$x_{(I)} = \frac{u_k \cdot S_V}{100 \cdot S_R} \quad (-; \%, MVA, MVA)$$

Transformátor (dvouvínutový):

$$z_{(I)} = \frac{u_k \cdot S_V}{100 \cdot S_{nT}} \quad (-; \%, MVA, MVA)$$

Vedení:

$$x_{(I)} = X_k \cdot I \cdot \frac{S_V}{U_s^2} \quad (-; \Omega \cdot km^{-1}, km, MVA, kV)$$

$$r_{(I)} = R_k \cdot I \cdot \frac{S_V}{U_s^2} \quad (-; \Omega \cdot km^{-1}, km, MVA, kV)$$

Asynchronní motor:

$$x_{(I)} = \frac{S_V}{i_z \cdot S_{nM}} \quad (-; MVA, -, MVA)$$

Trojvinut'ový transformátor:

$$x_{A(1)} = \frac{1}{2} \cdot (u_{AB} + u_{AC} - u_{BC}) \cdot \frac{S_v}{100 \cdot S_{nT}}$$

$$x_{A(1)} = \frac{1}{2} \cdot (u_{AB} + u_{BC} - u_{AC}) \cdot \frac{S_v}{100 \cdot S_{nT}} \quad (-; \%, MVA, MVA)$$

$$x_{A(1)} = \frac{1}{2} \cdot (u_{AC} + u_{BC} - u_{AB}) \cdot \frac{S_v}{100 \cdot S_{nT}}$$

Zkratový proud lze samozřejmě počítat pomocí skutečných hodnot prvků udaných v ohmech. Tento výpočet vychází přímo z Ohmova zákona, kde impedance, reaktance atd. se uvažují v ohmech. Hodnoty prvků musíme přepočítat na hladinu zkratu.

Vzorce pro výpočet skutečných hodnot prvků udaných v ohmech:

Soustava:

$$Z_{(i)} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot I_k''} = \frac{c \cdot U_n^2}{S_k} \quad (\Omega; -, kV, kA, MVA)$$

Alternátor:

$$X_{(I)} = \frac{x_d'' \cdot U_{nG}^2}{100 \cdot S_{nG}} \quad (\Omega; \%, KV, MVA)$$

Reaktor:

$$X_{(I)} = \frac{10 \cdot u_R \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot I_n} \quad (\Omega; \%, kV, A)$$

Transformátor (dvouvinut'ový):

$$Z_{(I)} = \frac{u_k \cdot U_{nT}^2}{100 \cdot S_{nT}} \quad (\Omega; \%, kV, MVA)$$

Vedení:

$$X_{(l)} = X_k \cdot l \quad (\Omega; \Omega \cdot km^{-1}, km)$$

$$R_{(l)} = R_k \cdot l \quad (\Omega; \Omega \cdot km^{-1}, km)$$

Asynchronní motor:

$$X_{(l)} = \frac{U_{nM}^2}{i_z \cdot S_{nM}} = \frac{U_{nM}}{i_z \cdot \sqrt{3 \cdot I_{nM}}} = \frac{U_{nM}}{\sqrt{3 \cdot I_z}} \quad (\Omega; kV, -, MVA)$$

Přepočet impedancí, proudů a napětí

Při výpočtu zkratových proudů v soustavách s různými hladinami napětí je nutné provést přepočet impedancí, proudů a napětí z jedné hladiny do druhé. Při výpočtu v poměrných hodnotách nebo obdobných jednotkových soustavách není žádný přepočet nutný.

Impedance zařízení v nadřazené či podřazené síti se dělí nebo násobí druhou mocninou jmenovitého transformačního převodu t_r nebo ve zvláštních případech druhou mocninou transformačního převodu t odpovídajícího skutečné poloze přepínače odboček, je-li tato známa.

Napětí a proudy se přepočítávají jmenovitým převodem transformátoru t_r nebo převodem t .

Nárazový zkratový proud i_p se určí pomocí vzorce:

$$i_p = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_k''$$

kde κ je součinitel nárazového zkratového proudu

I_k'' počáteční rázový zkratový proud [kA]

Nárazový zkratový proud i_p namáhá celý obvod zkratu – tj. vypínače, sběrnice, vinutí transformátoru apod. - elektrodynamickými silami. Defínován je jako vrcholová hodnota první amplitudy zkratového proudu při největší možné stejnosměrné složce.

Hodnota nárazového zkratového proudu závisí od impedance zkratového obvodu. Největší vyrovnávací proudy tečou při zkratech na svorkách generátoru. Při zkratech vzdálenějších od generátoru vzniká jenom malé přechodové zvětšení proudu nad hodnotu v ustáleném stavu. i_p určuje poměr napětí před vznikem zkratu k impedanci zkratového okruhu a klesá tím rychleji, čím větší je rozdíl mezi počáteční a ustálenou hodnotou zkratového proudu.

Součinitel nárazového zkratového proudu κ příspěvku ze soustavy (elektricky vzdálený zkrat) se určí buď vzorcem:

$$\kappa = 1 + e^{-\frac{0,001}{T_a}} = 1 + 1 / e^{\frac{0,001}{T_a}}$$

nebo pomocí impedancí:

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

nebo není-li výpočet prováděn s impedancemi, použije se hodnota κ podle následující tabulky:

Tabulka 2: Hodnoty součinitele κ pro výpočet nárazového zkratového proudu

2. Místo zkratu	κ
za alternátory do 55 MW	1,95
1) v soustavě vvn, zvn	1,7
v soustavě vn	1,6
v soustavě nn	1,4
v kabelovém rozvodu nn ²⁾	1,3
za transformátory ³⁾	1,7
vvn / vn nebo vn / nn	1,3
vn / nn do 250 kVA	1,5
včetně	1,6
do 630 kVA	
včetně	
do 1600 kVA	
včetně	
POZNÁMKA 1) - Pro zkrat v blízkosti alternátoru nebo za blokovým transformátorem;	
POZNÁMKA 2) - Pro zkrat vzdálený od napájecího transformátoru i alternátoru (impedance mezi místem zkratu a napájecím transformátorem je větší než 10% ze sousledné impedance zkratového obvodu);	
POZNÁMKA 3) - Pro zkrat v blízkosti sekundární strany transformátoru (impedance mezi místem zkratu a napájecím transformátorem je do 10% sousledné impedance zkratového obvodu).	

Vypínací zkratový proud v součinu s napětím místa zkratu představuje tzv. zkratový výkon a je jedním z hlavních údajů vypínačů. Pro volbu vypínače se určuje souměrný vypínací proud a stejnosměrná složka

vypínacího zkratového proudu, obě hodnoty pro nejkratší dobu vypnutí T_{\min} [s].

Souměrný vypínací zkratový proud I_b .

- Pro příspěvek soustavy s asynchronními motory, elektricky **vzdáleného** synchronního stroje, nebo pro zkratové příspěvky z různých zdrojů procházející do místa zkratu společnou cestou, lze uvažovat:

$$I_b = I_k''$$

- Pro synchronní stroj, prochází-li jeho zkratový příspěvek při elektricky **blízkém** zkratu samostatnou cestou (tj. synchronní stroj je připojen radiálně do místa zkratu):

$$I_b = \mu \cdot I_k''$$

kde μ je součinitel, který představuje poměr efektivní hodnoty celkového vypínacího zkratového proudu a efektivní hodnoty subtransitního proudu

Stejnosemenná složka vypínacího zkratového proudu I_{avyp} se určí vztahem:

$$I_{avyp} = \sqrt{2} \cdot I_k'' \cdot e^{-\frac{T_{\min}}{T_a}}$$

kde I_k'' je počáteční rázový zkratový proud [kA]

T_{\min} nejkratší doba vypnutí [s]

T_a časová konstanta stejnosměrné složky příspěvku zkratového proudu [s]

Ustálený zkratový proud I_k .

Pro zkraty počítané jako zkraty elektricky vzdálené, pro dimenzování zařízení:

$$I_k = I_{kM}''$$

kde I_{kM}'' je počáteční rázový zkratový proud bez uvažování vlivu asynchronních motorů [kA]

Ekvivalentní oteplovací zkratový proud I_{th} pro obecný průběh proudu $i_k(t)$:

$$I_{th} = \sqrt{\frac{Q}{T_k}}$$

kde Q je Jouleův integrál [A².s]

T_k doba trvání zkratu [s]

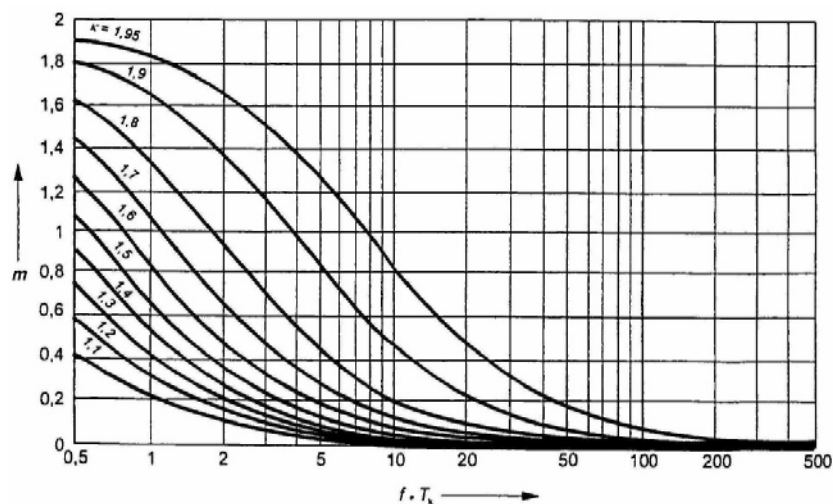
Ekvivalentní oteplovací zkratový proud lze prakticky určit :

$$I_{th} = I_k' \sqrt{m + n}$$

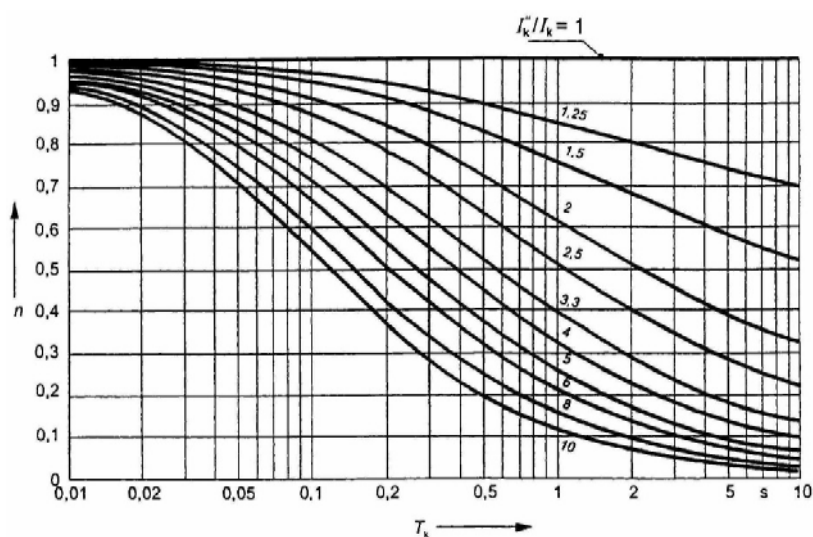
m součinitel tepelného účinku stejnosměrné složky zkratového proudu

n součinitel tepelného účinku střídavé složky zkratového proudu;

Součinitele m , n lze určit z následujících dvou grafů:



obr.2.4.6.a Součinitel m pro tepelný účinek stejnosměrné složky zkratového proudu



obr.2.4.6.b Součinitel n pro tepelný účinek střídavé složky zkratového proudu

Pro distribuční sítě (elektricky vzdálené zkraty) se může obvykle použít $n = 1$.

Pro elektricky vzdálené zkraty (distribuční sítě) se jmenovitou dobou trvání zkratu 0,5s nebo větší, je dovolené uvažovat s $m + n = 1$.

Pro orientační stanovení I_{th} se může použít tento méně přesný postup výpočtu:

$$I_{th} = I_k' \cdot k_e$$

koeficient k_e můžeme určit i z této tabulky:

t_k [s]	k_e	
	hladina napětí soustavy	
	VVN, VN	NN
$\leq 0,05$	1,6	1,5
$0,05 < \leq 0,1$	1,5	1,2
$0,1 < \leq 0,2$	1,4	1,1
$0,2 < \leq 1,0$	1,3	1,05
$1,0 < \leq 3,0$	1,1	1,0
$3,0 <$	1,0	1,0

tab.2.4.6 hodnoty koeficientu k_e

3. Výpočet účinků zkratových proudů

Elektrické zařízení musí být voleno tak, aby při působení zkratových proudů, které se mohou v elektrickém zařízení vyskytnout, nebylo překročeno mechanické a tepelné namáhání, které je pro dané zařízení dovolené a které tedy bez poškození snese.

Z hlediska mechanických účinků zkratového proudu zařízení vyhovuje, jestliže všechny jeho části v silovém obvodu splňují podmínku

$$i_p \leq I_{dyn}$$

tzn. je-li vypočtený nárazový zkratový proud i_p menší (nebo alespoň stejný) než tzv. dynamický proud I_{dyn} uvažovaného zařízení a každé jeho části. Tuto

podmínku musí plnit zejména vypínače, odpínače, odpojovače, přístrojové transformátory, popř. i přímá nadproudová relé, v zařízeních nn pak ještě jističe a stykače. Velikost jejich dynamického proudu I_{dyn} udávají výrobci.

3.1. Výpočet elektromagnetických sil

3.1.1. Výpočet vrcholové síly mezi vodiči při zkratu

V trojfázové soustavě je na vodiče při zkratu dána vztahem:

$$F_{m3} = k_1 \cdot k_2 \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot i_{p3}^2 \cdot \frac{l}{a_m}$$

kde i_{p3} je vrcholová hodnota zkratového proudu v případě souměrného trojfázového zkratu;
 l délka souběhu vodičů;
 a_m vzdálenost mezi vodiči,
 k_1 koeficient tvaru vodiče (pro kruhový je roven jedné)
 k_2 koeficient uspořádání vodičů (0,81 – 1 dle uspořádání a fázového posuvu)

3.2. Tepelné účinky zkratového proudu

Z hlediska tepelného namáhání při zkratu elektrické zařízení vyhovuje, jestliže toto zařízení a všechny části hlavních obvodů splňují podmínku, že jmenovitý krátkodobý nadproud I_t tohoto zařízení a všech jeho částí je větší než vypočtený ekvivalentní oteplovací zkratový proud I_{th} , tzn. Když

$$I_{th1} \leq I_{t1}$$

Oba proudy musí být přepočteny na stejnou dobu.

Jmenovité krátkodobé proudy I_{t1} udávají pro vypínače, odpínače, odpojovače, přístrojové transformátory proudu, popř. přímá nadproudová relé, přístrojové, vodičové svorky a pro zařízení nn ještě jističe a stykače výrobci pro dobu 1 s.

Vypočtený ekvivalentní oteplovací proud I_{th} , stanovený pro určitou dobu zkratu t_k , musíme přepočítat na hodnotu I_{th1} , která odpovídá fiktivní době zkratu 1 s vztahem

$$I_{th1} = I_{th} \cdot \sqrt{t_k} \quad [\text{kA}; \text{kA}, \text{s}]$$

Pro vodiče výrobci tepelnou odolnost při zkratu neudávají. Musíme ji zkontrolovat tím, že určíme minimální průřez S_{\min} , který může mít vodič, aniž by se nadměrným oteplením při zkratu znehodnotil. Tento průřez je dán vztahem

$$S_{\min} \geq \frac{I_{th} \cdot \sqrt{t_k}}{k} \quad [\text{mm}^2; \text{A}; \text{s}, -]$$

kde k lze určit z tabulek v EN 60909.

Orientačně:

$k =$ 115 pro měděné vodiče izolované PVC
135 pro měděné vodiče izolované pryží
70 pro hliníkové vodiče izolované PVC
87 pro hliníkové vodiče izolované pryží
115 pro cínem pájené spoje u měděných vodičů, odpovídající teplotě 160 °C.