

Výpočet skratových prúdov v distribučnej sústave 22/0,4 kV s podporou programu v Microsoft Excel

M. Gutten, M. Šebök, S. Kučera, M. Kučera

Žilinská univerzita, Elektrotechnická fakulta, Katedra merania a aplikovanej elektrotechniky, Žilina

E-mail : gutten@fel.uniza.sk

Anotace:

Elektrické zariadenia musia byť navrhnuté tak, aby pri pôsobení skratových prúdov, ktoré sa môžu v danom mieste vyskytnúť, nevzniklo na nich poškodenie alebo deformácia elektrického, mechanického alebo tepelného charakteru. Je preto nutné, vzhľadom k nebezpečným účinkom skratových prúdov na elektrické zariadenia, poznať skratové pomery v celej dĺžke elektrického obvodu.

Článok sa zameriava na určenie presného výpočtu trojfázových a nesymetrických jednofázových skratových prúdov v trojfázovej sústave v distribučnej sústave 22/0,4 kV s podporou programu vytvoreného zo súboru Microsoft Excel.

V článku je uvedený postup výpočtu skratových prúdov cez pomerné hodnoty impedancií v trojfázovej sústave.

ÚVODNÝ POPIS ANALÝZY

Vzhľadom k nebezpečným účinkom skratových prúdov na elektroenergetické zariadenia, patrí znalosť skratových pomerov v celej dĺžke elektrického obvodu k najdôležitejším podkladom pre projektovanie. Nastavenie vypínačov a ističov, resp. ochrán sa určuje podľa vypínacieho skratového prúdu I_{VYP} , mechanické účinky sa určujú z nárazového skratového prúdu i_p a tepelné účinky z ekvivalentného krátkodobého otepľovacieho skratového prúdu I_{th} . V praxi sa i_p , I_{th} a I_{VYP} počítajú z počiatočného rázového skratového prúdu I''_k .

Program s podporou Microsoft Excel, vytvorený na našej katedre, zahŕňa celkovú analýzu výpočtu skratových pomerov v trojfázovej sústave s napäťovou hladinou vn/nn (napr. 22/0,4 kV).

Požiadavku vytvorenia takéhoto programu ponúkla našej katedre firma Stredoslovenská energetika a. s. Žilina s odboru projektovania, nakoľko katedra má dlhú tradíciu v oblasti výpočtov v teoretickej elektrotechnike.

VÝPOČTOVÁ ŠTRUKTÚRA PROGRAMU

V 1. kroku sa zvolí **vzťažný výkon S_V a vzťažné napätie U_V** . Pri výpočte skratových pomerov sa napätie U_V volí podľa menovitého napätia v mieste skratu.

Pokiaľ nie sú prevody transformátorov zhodné s pomerom vzťazných napätí sietí, ktoré spájajú, použije sa pre prepočet pomerných hodnôt **pomerný prevod transformátora p_p** :

$$p_p = \frac{U_{n1T}}{U_{n2T}} \cdot \frac{U_{V2}}{U_{V1}} \quad (1)$$

kde U_{n1T} je napätie transformátora na strane 1,
 U_{n2T} je napätie transformátora na strane 2,
 U_{V1} je vzťažné napätie na strane 1,
 U_{V2} je vzťažné napätie na strane 2.

Zo zadanej hodnoty skratového výkonu S''_k napájacej siete S sa určí **pomerná súsledná impedancia sústavy $z_{S(1)}$** v %:

$$z_{S(1)} = \frac{c \cdot S_V}{S''_k} \cdot \frac{100}{p_p^2} \quad (2)$$

kde c je napäťový súčiniteľ, kde pre sústavu

- vn je $c = 1,1$
- nn je $c = 1,0$,

S_V je vzťazný zvolený výkon v MVA,

S''_k je trojfázový skratový výkon v MVA získaný z nadradeného rozvodného závodu,

p_p je pomerný prevod transformátora podľa vzťahu (1).

Všetky súsledné impedancie elektrických vedení $Z_{v(1)}$ udaných v Ω/km sa prepočítajú na **pomerné súsledné impedancie elektrických vedení $z_{v(1)}$** v %:

$$z_{v(1)} = Z_{v(1)} \cdot l_v \cdot \frac{S_V}{U_n^2} \cdot \frac{100}{p_p^2} \quad (3)$$

kde Z_v je impedancia elektrického vedenia v Ω/km , pričom platí, že

$$Z_{v(1)} = \sqrt{R_t^2 + X^2} \quad (4)$$

R_t je rezistencia elektrického vedenia v Ω/km pri prevádzkovej teplote t ,

X je reaktancia elektrického vedenia v Ω/km ,

l_v je dĺžka elektrického vedenia v km,

U_n je menovité napätie počítaného elektrického vedenia v kV.

Všetky napätia nakrátko transformátorov u_k udaných v % sa prepočítajú na **pomerné súsledné impedancie transformátorov** $z_{T(1)}$ v %:

$$z_{T(1)} \& x_{T(1)} = u_k \cdot \frac{S_V}{S_{nT}} \cdot \frac{1}{p_p^2} \quad (5)$$

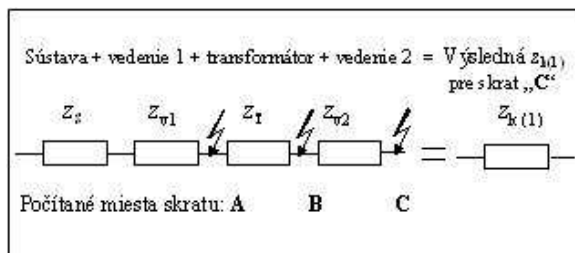
kde u_k je menovité napätie nakrátko v %, S_{nT} je menovitý výkon transformátora v MVA.

Rezistencia u transformátorov vn/nn sa nedoporučuje zanedbávať a je nutné s ňou uvažovať, ak ju treba k určení ďalších hodnôt priebehu skratového prúdu:

$$r_{T(1)} = \frac{P_{knT} \cdot S_V}{S_{nT}^2 \cdot p_p^2} \cdot 100 \quad (6)$$

kde P_{knT} sú menovité straty nakrátko v MVA.

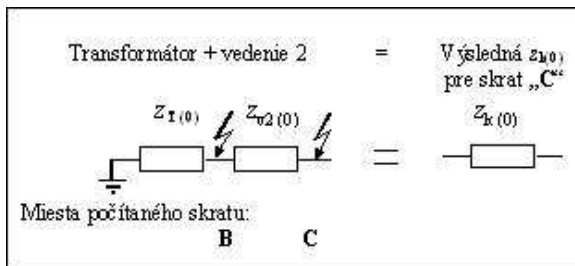
Skutočné schémy sústavy sa **prekreslia na náhradnú schému** pre výpočet **pomernej súslednej impedancie skratového obvodu** $z_{k(1)}$ v % a počíta sa medzi miestom skratu a napájacou sústavou (podľa obr. 1).



Obr. 1: Schéma pomerných súsledných impedancií

Pri výpočte **jednofázových skratových prúdov u trojfázových sietí nn** sa počíta aj s pomernou **spätnou** a **netočivou** impedanciou elektrických zariadení.

Pomerná spätná impedancia - u všetkých energetických zariadení (okrem hydroalternátorov) je rovná pomernej súslednej impedancii. Pre výpočet spätneho skratového obvodu sa počíta taktiež medzi miestom skratu a napájacou sústavou, preto pre ňu platí pôvodná náhradná schéma ako pre pomernú súslednú impedanciu.



Obr. 2: Schéma pomerných netočivých impedancií

Pomerná netočivá impedancia - pre výpočet skratového obvodu sa musí počítať už s novou

náhradnou schémou, pretože takmer u všetkých elektroenergetických zariadení je jej hodnota oproti súslednej zložke rozdielna. Okrem toho pomerná netočivá impedancia skratového obvodu $z_{k(0)}$ sa vypočíta medzi miestom skratu a všetkými uzemneniami v obvode (podľa obr. 2).

Pomocou výsledných prepočítaných impedancií skratového obvodu zložkových sústav $z_{k(1)}$, $z_{k(2)}$ a $z_{k(0)}$ **sa určia potrebné hodnoty skratových prúdov** vo zvolených miestach skratu:

Pre trojfázový skrat v mieste skratu „C“:

$$I''_{k3} = \frac{c}{\sqrt{3}} \cdot \frac{S_V}{U_{VC} \cdot z_{k(1)}} \cdot 100 \quad (7)$$

$$I''_{k3} = \frac{S''_K}{\sqrt{3} \cdot U_{VC}} \quad (8)$$

pričom U_{VC} je vzťahné napätie v mieste skratu „C“ v kV,

$z_{k(1)}$ je prepočítaná pomerná impedancia skratového obvodu súslednej sústavy v % (od miesta napájania až po miesto skratu „C“ – obr. 1).

Pre jednofázový skrat v mieste skratu „C“:

$$I''_{k1} = \sqrt{3} \cdot \frac{c \cdot S_V}{U_{VC} \cdot (z_{k(1)} + z_{k(2)} + z_{k(0)})} \cdot 100 \quad (9)$$

kde $z_{k(1)}$ je prepočítaná pomerná impedancia skratového obvodu *súslednej* sústavy v %, $z_{k(2)}$ je prepočítaná pomerná impedancia skratového obvodu *spätnej* sústavy v %, $z_{k(0)}$ je prepočítaná pomerná impedancia skratového obvodu *netočivej* sústavy v % (od miesta uzemnenia až po miesto skratu „C“ – obr. 2).

Nárazový skratový prúd i_p je najväčšia možná vrcholová hodnota skratového prúdu. Tento prúd je smerodajný pre určenie mechanického namáhania jednotlivých častí obvodu.

Vypočíta sa zo vzťahu:

$$i_p = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I''_k \quad (10)$$

kde κ je súčiniteľ nárazového skratového prúdu,

I''_k je počítačný rázový skratový prúd v kA.

Ekvivalentný krátkodobý otepľovací skratový prúd I_{th} je smerodajný pre stanovenie tepelného namáhania elektrického zariadenia skratovým prúdom a určí sa:

- ♦ pomocou výpočtu Jouleovho integrálu.
- ♦ pomocou hodnôt m a n stanovených empirickými vzťahmi. Platí:

$$I_{th} = I''_k \cdot \sqrt{m+n} \quad (11)$$

kde m a n sú súčinitele tepelného účinku jednosmernej a striedavej zložky skratového prúdu. Pre distribučnú sieť je obvykle $n = 1$.

Skratové prúdy musia byť vypnuté skôr, než dôjde k otepleniu vodičov nad prípustnú hranicu.

Pre skraty s dobou trvania t až do 5 s, sa doba trvania skratu, v ktorej daný skratový prúd zvýši teplotu vodičov z najvyššej dovolenej prevádzkovej teploty na medznú teplotu, vypočíta zo vzťahu:

$$\sqrt{T} = k \cdot \frac{S}{I_{th}} \quad (12)$$

kde: T - doba trvania skratu v s,

S - prierez vodiča v mm^2 ,

I_{th} - ekvivalentný otepľovací prúd v A,

k - koeficient rešpektujúci teplotu pred skratom a po skrate a fyzikálne vlastnosti materiálu vodiča v $\text{A} \cdot \text{s}^{1/2} \cdot \text{mm}^{-2}$.

Pretože sa pri výpočte neuvažuje odvod tepla, predpokladá sa, že je v celom priereze vodiča rovnaká teplota.

PROGRAMOVÁ ŠTRUKTÚRA SÚBORU

Program obsahuje dva základné zošity, ktoré sú vzájomne prepojené (.xls):

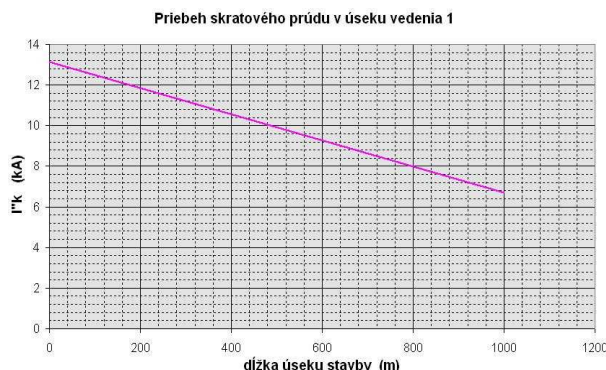
- Skratys.xls**, ktorý umožňuje vykonávať jednotlivé výpočty a simulácie v oblasti skratových pomerov a dimenzovania jednotlivých vodičov na tepelné a mechanické účinky skratových prúdov.
- Moduls.xls**, ktorý umožňuje nadštandardnú spoluprácu s predchádzajúcim užívateľským zošitom v oblasti dialógových okien, databázy a programovania vo Visual Basic (ďalej len VB).

Programová štruktúra obidvoch zošitov s vlastnosťami jednotlivých listov je uvedený v tabuľke 1 a 2 a štruktúra databázy a programovania vo VB je uvedený v tabuľke 3.

Tab.1: Charakteristika listov zošita Skratys.xls

Listy (Hárky)	Charakteristika listov
Úvod	Úvodná obálka zošita s popisom
Výpočet vn/nn	Výpočet skratových prúdov v sústave vn/nn s dimenzovaním elektrických vedení a prípojnic vzhľadom na ich tepelné a mechanické účinky (obr. 4)
Graf	Grafický priebeh veľkosti počiatočného skratového prúdu pozdĺž počítaného úseku (obr. 3)
Help	Nápoveda (pomocník) programu
Dáta ke	Tabuľka konštánt k_e pre výpočet otepľovacieho skratového prúdu I_{th}
Dáta κ	Tabuľka konštánt κ pre výpočet nárazového skratového prúdu i_p
Dáta lán	Databáza lanových vodičov pre sústavu vn a nn

Dáta káble	Databáza káblových vodičov pre sústavu vn a nn
Nové..	Databáza užívateľom zadovaných vodičov pre sústavu vn a nn



Obr. 3: Grafický priebeh veľkosti počiatočného skratového prúdu pozdĺž počítaného úseku

Tab.2: Charakteristika listov zošita Moduls.xls

List 1	Úvodná obálka zošita s popisom
Dialóg0	Dialógové okno pre vloženie názvy stavby a zobrazenie úvodného postupu v sústave vn a nn
DialógH1	Zobrazenie okna pre náhľad do nápovedy 1 (pomocníka 1)
DialógH2	Zobrazenie okna pre náhľad do nápovedy 2 (pomocníka 2)
Dialóg_vn	Dialógové okno pre zobrazenie roletového menu databázy lanových a káblových vodičov v sústave vn pre určenie skratových pomerov a dimenzovanie
Dialóg_zvod	Dialógové okno pre zobrazenie roletového menu databázy lanových a káblových vodičov v sústave nn pre určenie skratových pomerov a dimenzovanie zvodu k hlavnému rozvádzaču
Dialóg_nn	Dialógové okno pre zobrazenie roletového menu databázy lanových a káblových vodičov v sústave nn od hlavného rozvádzača až po posledný bod napájania

Tab.3: Charakteristika modulov zošita Moduls.xls

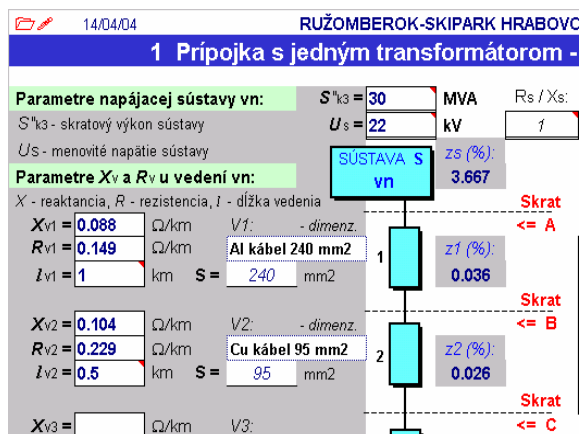
Modul vn a nn	Databáza impedančných parametrov niektorých elektrických vodičov a prípojnic v sústave vn a nn
Modul const	Databáza niektorých základných konštánt pre výpočet skratových prúdov a vymazanie buniek pre ďalší výpočet

Modul dim	Databáza izolačných parametrov niektorých elektrických vodičov a prípojnic v sústave vn a nn pre dimenzovanie
Modul dialog	Príkazy pre vytvorenie dialógových okien
Modul pamäť	Príkazy pre uloženie parametrov odbočiek do pamäte programu

POPIS UŽIVATEĽSKÉHO POSTUPU ZADÁVANIA PARAMETROV

Zadanie skratového výkonu napájacej sústavy S''_{k3} pre výpočet trojfázových skratových prúdov a jednofázový skratový prúd sústavy I''_{k1} pre výpočet jednofázových nesúmerných skratových prúdov (S''_{k3} a I''_{k1} sa zisťuje z príslušného energetického závodu – obr.4).

Klipnutím na jednotlivé políčka schematických značiek impedancií sa zobrazí dialógové okno databázy vodičov vn alebo nn vedení – obr. 5.



Obr. 4: Ukážka hlavného listu pre výpočet skratových prúdov



Obr. 5: Dialógové okno databázy vodičov vn vedení

Pre výpočet skratových pomerov je potrebné zvoliť vhodný typ elektrického vedenia z roletového zoznamu (podľa prierezu a materiálu vodiča). Program si zvolí povinne reaktanciu X_v , rezistenciu R_v , prierez fázového vodiča S a nepovinne názov typu vedenia. Dĺžku vedenia l_v je potrebné zvoliť priamo do bunky.

Pre dimenzovanie vedení vzhľadom na tepelné účinky skratových prúdov je potrebné zvoliť podľa roletového zoznamu vhodnú izoláciu pre káble príp. pomer Al/Fe u lán pre navrhované vedenia.

Program si z jednotlivých parametrov vedení určí výpočtom hodnotu koeficienta κ pre dimenzovanie vzhľadom na mechanické účinky skratových prúdov.

Hodnota času T_k (doba skratu) sa doplní podľa nastavenia ochrán príp. istiacich prvkov. Uvedená hodnota kontroluje správnosť dimenzovania elektrických vedení. Ak vypočítaná hodnota doby skratu T je väčšia ako T_k , dimenzovanie vzhľadom na tepelné účinky skratového prúdu je vykonané správne.

ZÁVER

V súčasnosti je nutnosťou, aby elektroinžinier - projektant používal podobné programy pri výpočtoch elektrických obvodoch. Výpočty elektrických obvodov sú jednoduchšie a komplexnejšie a vďaka presnosti sú vypočítané hodnoty v súlade s požiadavkami STN.

Veľkou výhodou je možnosť zobrazenia grafických závislostí (obr. 3) a uloženia výpočtov do databázy podľa jednotlivých projektov.

Príspevok v tomto článku je súčasťou riešenia projektu VEGA 1/0548/09 – Diagnostika výkonových transformátorov vzhľadom na účinky skratových prúdov a nadprúdov.

LITERATÚRA

- [1] Gutten, M.: Základný pohľad na výpočet skratových pomerov v trojfázovej sústave, 15. seminár Workshop doktorandů, XV. sešit katedry teoretické elektrotechniky, VŠB - TU Ostrava 2001, str. 41 – 46
- [2] Gutten, M.: Dimenzovanie elektrických zariadení v trakčnej transformovni vzhľadom na účinky skratových prúdov, Dizertačná práca, ŽU v Žiline 2002
- [3] STN IEC 60909: Výpočet skratových prúdov v trojfázových striedavých sústavách, 2000
- [4] STN EN 60865-1: Skratové prúdy - Výpočet účinkov - Časť 1.: Definície a výpočtové metódy, 1998
- [6] STN 33 2000-4-43: Ochrana proti nadprúdom, 1995