

doc. Ing. Ladislav Varga, PhD. – Ing. Daniel Hlubeň, PhD.

Meracie metódy v elektroenergetike



ABB

Technická
univerzita
Košice



Obsah

| | |
|---|-----------|
| ÚVOD..... | 9 |
| 1. Meranie parametrov elektrických silových vedení..... | 11 |
| 1.1. Rozklad nesymetrickej sústavy na symetrické zložky..... | 11 |
| 1.1.1. Úloha č. 1..... | 14 |
| 1.1.2. Úloha č. 2..... | 14 |
| 1.2. Meranie symetrických zložiek impedancií a kapacít elektrických vedení..... | 15 |
| 1.2.1. Meranie súslednej zložky impedancie vedenia – Z_1 | 16 |
| 1.2.2. Meranie netočivej zložky impedancie vedenia – Z_0 | 18 |
| 1.2.3. Meranie impedancie slučky vodič – zem – Z_{f-0} | 20 |
| 1.2.4. Meranie netočivej zložky vzájomnej impedancie medzi vedeniami – Z_{0M} | 21 |
| 1.2.5. Meranie impedancií napätím s frekvenciou odlišnou od 50 Hz..... | 22 |
| 1.2.6. Meranie kapacity vodičov vedenia proti zemi – C_0 | 23 |
| 1.2.7. Meranie prevádzkovej kapacity vedenia – C_1 | 24 |
| 1.2.8. Meranie parametrov elektrických vedení pomocou sieťového analyzátor..... | 26 |
| 1.2.9. Meranie parametrov elektrických vedení modernými meracími prístrojmi..... | 27 |
| 2. Uzemnenie a jeho meranie..... | 31 |
| 2.1. Odpor uzemnenia a vlastnosti pôdy..... | 32 |
| 2.1.1. Voda v pôde..... | 32 |
| 2.1.2. Rezistivita pôdy..... | 33 |
| 2.2. Meranie rezistivity pôdy..... | 34 |
| 2.2.1. Geoelektrické meranie..... | 36 |
| 2.2.2. Wennerovo usporiadanie..... | 38 |
| 2.3. Základné druhy uzemňovačov..... | 42 |
| 2.3.1. Guľové elektródy..... | 43 |
| 2.3.2. Doskové uzemňovače..... | 43 |
| 2.3.3. Uzemňovacie pásiky a drôty..... | 44 |
| 2.3.4. Uzemňovacie rúrky a tyče..... | 47 |
| 2.3.5. Združené uzemňovače..... | 47 |
| 2.3.6. Uzemňovače z konštrukčných prvkov..... | 50 |
| 2.4. Priebeh napätia na uzemňovačoch..... | 50 |
| 2.5. Meranie odporu uzemnenia..... | 52 |
| 2.5.1. Kompenzačná metóda..... | 53 |
| 2.5.2. Vplyv rôznych činiteľov na presnosť merania..... | 54 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 2.5.3. | Voltampérová metóda merania odporu uzemnenia..... | 58 |
| 2.5.4. | Meranie uzemnenia voltampérovou metódou bez odpojenia uzemnenia..... | 59 |
| 2.5.5. | Meranie odporu uzemnenia rozsiahlych uzemňovacích sústav | 60 |
| 2.5.6. | Meranie odporu uzemnenia stožiarov vzdušných silových vedení | 66 |
| 2.5.7. | Vylúčenie vplyvu rušivých napätí..... | 72 |
| 2.6. | Meranie dotkových, krokových a zavlečených napätí..... | 72 |
| 2.6.1. | Dotkové a krokové napätie | 72 |
| 2.6.2. | Posudzovanie celistvosti rozľahlej uzemňovacej sústavy | 77 |
| 2.6.3. | Zavlečené napätia | 79 |
| 2.6.4. | Meranie dotkových a krokových napätí | 81 |
| 2.6.5. | Meranie zavlečených napätí..... | 84 |
| 3. | Merania pri vykonávaní revízií elektrických zariadení a elektrických inštalácií do 1 000 V a iné diagnostické merania..... | 87 |
| 3.1. | Meranie elektrických inštalácií..... | 87 |
| 3.1.1. | Meranie spojitosti vodičov..... | 87 |
| 3.1.2. | Meranie izolačného odporu elektrickej inštalácie | 88 |
| 3.1.3. | Meranie odporu/impedancie podlahy a stien..... | 89 |
| 3.1.4. | Meranie impedancie vypínacej slučky..... | 91 |
| 3.1.5. | Meranie prúdových chráničov | 95 |
| 3.1.6. | Skúška polarity | 96 |
| 3.1.7. | Kontrola sledu fáz..... | 96 |
| 3.1.8. | Funkčné skúšky | 99 |
| 3.1.9. | Úbytok napätia | 99 |
| 3.2. | Merania na elektrických spotrebičoch..... | 100 |
| 3.2.1. | Meranie odporu ochranného vodiča..... | 102 |
| 3.2.2. | Meranie izolačného odporu..... | 102 |
| 3.2.3. | Meranie unikajúceho prúdu | 104 |
| 3.2.4. | Meranie prúdu pretekajúceho ochranným vodičom..... | 104 |
| 3.2.5. | Meranie dotkového prúdu | 105 |
| 3.2.6. | Meranie náhradného unikajúceho prúdu | 106 |
| 3.3. | Merania na ručnom náradí..... | 107 |
| 3.3.1. | Pripojenie ochranného vodiča | 107 |
| 3.3.2. | Izolačný odpor | 108 |
| 3.4. | Preverenie účinného spojenia neživých častí chránených zariadení s ochranným obvodom | 109 |
| 3.5. | Meranie napätia..... | 110 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 3.6. | Meranie prúdu..... | 110 |
| 3.7. | Meranie kvality elektriny..... | 112 |
| 3.7.1. | Frekvencia napájacej siete | 112 |
| 3.7.2. | Veľkosť napájacieho napätia | 112 |
| 3.7.3. | Miera vnímania blikania – flicker | 112 |
| 3.7.4. | Nesymetria napájacieho napätia | 113 |
| 3.7.5. | Harmonické napätia | 113 |
| 3.7.6. | Medziharmonické napätia | 115 |
| 3.7.7. | HDO | 116 |
| 3.7.8. | Vysokofrekvenčné signály..... | 116 |
| 3.7.9. | Udalosti..... | 117 |
| 3.7.10. | Vyhodnotenie meraní..... | 117 |
| 3.8. | Termovízne merania..... | 120 |
| 3.8.1. | Teoretický úvod | 120 |
| 3.8.2. | Parametre meraného objektu | 122 |
| 3.8.3. | Vyhodnocovanie termovíznych meraní | 125 |
| 3.9. | Vizualizácia javov v UV spektre (koróna) | 129 |
| 3.10. | Meranie umelého osvetlenia..... | 131 |
| 3.10.1. | Úvod | 131 |
| 3.10.2. | Definície základných pojmov | 131 |
| 3.10.3. | Požadované hodnoty podľa STN EN 12 464-1 | 132 |
| 3.10.4. | Príprava merania..... | 133 |
| 3.10.5. | Pravidelný priestor so svietidlami v dvoch alebo viacerých radoch | 135 |
| 3.10.6. | Pravidelný priestor so svietidlami v jednom rade | 136 |
| 3.10.7. | Pravidelný priestor s jedným svietidlom..... | 137 |
| 3.10.8. | Pravidelný priestor s dvomi alebo viacerými súvislými radmi svietidiel (napr. žiarivkový pás)..... | 137 |
| 3.10.9. | Pravidelný priestor s jedným súvislým radom svietidiel | 138 |
| 3.10.10. | Zhodnotenie merania | 138 |
| 3.10.11. | Overenie osvetlenosti podľa STN EN 12464-1 | 140 |
| 4. | Merania pri vyhodnocovaní korózneho napadnutia elektroenergetických zariadení..... | 141 |
| 4.1. | Korózia..... | 141 |
| 4.1.1. | Elektródový a štandardný potenciál..... | 142 |
| 4.1.2. | Pourbaixove (E-pH) diagramy a ich využitie | 146 |
| 4.1.3. | Kinetika koróznych reakcií..... | 147 |
| 4.1.4. | Vybrané formy korózie | 148 |
| 4.1.5. | Charakteristika vybraných koróznych prostredí | 150 |

| | | |
|------------------------|--|------------|
| 4.2. | Zisťovanie intenzity korózneho napadnutia | 152 |
| 4.2.1. | Meranie potenciálu chránený kov – pôda | 153 |
| 4.2.2. | Meranie intenzity cudzieho prúdového poľa | 154 |
| 4.2.3. | Stanovenie veľkosti a smeru prúdu v chránenom zariadení..... | 156 |
| Register | | 160 |
| Zoznam tabuliek | | 163 |
| Zoznam obrázkov | | 165 |
| Literatúra | | 171 |
| Profily autorov | | 175 |

1. MERANIE PARAMETROV ELEKTRICKÝCH SILOVÝCH VEDENÍ

Na rôzne účely praxe je nutné poznať elektrické parametre vonkajších a káblových vedení. Jedna z najdôležitejších potrieb je správne nastavenie elektrických ochrán vzdušných vedení, pretože sú zo všetkých prvkov elektrizačnej sústavy najviac vystavené poruchám. Pre správne nastavenie citlivosti elektrických ochrán je potrebné poznať veľkosti poruchových prúdov, ktorých veľkosť závisí predovšetkým od parametrov elektrických vedení. Navyše, podľa veľkosti poruchových prúdov sa dimenzujú elektrické zariadenia, resp. hodnotí sa bezpečnosť prevádzky.

Základnými primárnymi parametrami sú **rezistancia** (činný odpor), **indukčnosť** (prípadne indukčná reaktancia), **konduktancia** (vodivosť – zvod) a **kapacita** (prípadne kapacitná vodivosť – susceptancia). Spravidla sa určujú na jednotku dĺžky vedenia.

Rezistancia a indukčnosť vedenia tvoria pozdĺžnu impedanciu vedenia. Zvod a kapacita tvoria priečnu admitanciu vedenia.

Z hľadiska prevádzky patrí medzi najdôležitejšie parametre impedancia vedenia, resp. jej súmerné zložky. Je možné určiť ju výpočtom pri známom geometrickom usporiadaní fáz vedenia, dĺžke vedenia a použitom materiáli vodičov. Vzhľadom na časovú nestálosť týchto parametrov je najvýhodnejšie zisťovať ich hodnoty meraním. Vypočítané hodnoty parametrov vedení môžu pritom slúžiť ako spätná kontrola pri analýze nameraných výsledkov.

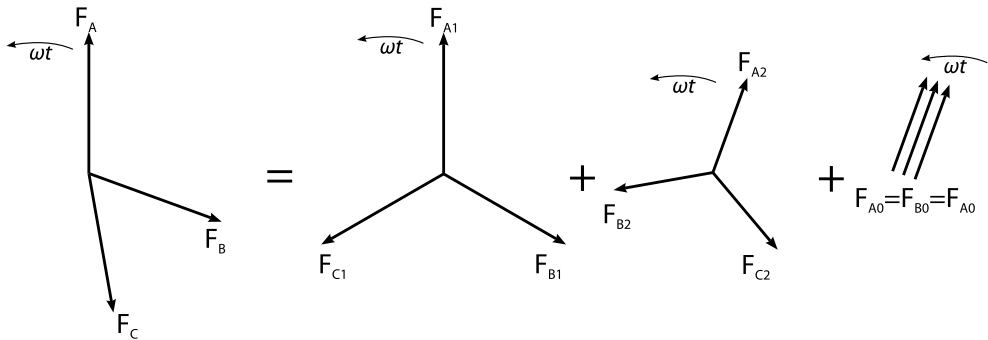
1.1. Rozklad nesymetrickej sústavy na symetrické zložky

Pri výpočte nesymetrických skratov (nesymetrického zaťaženia) v symetrickej trojfázovej sústave sa s výhodou používa metóda náhradných obvodov symetrických zložiek [10]. Filtr symetrických zložiek napätí a prúdov sa v obvodoch napájania ochrán využívajú na zachytenie porúch chráneného objektu.

Princíp metódy rozkladu nesymetrickej sústavy na symetrické zložky spočíva v tom, že trojfázové nesymetrické napätia, prúdy a impedancie je možné rozložiť všeobecne na dve točivé sústavy symetrických zložiek a jednu netočivú sústavu. Sú to nasledovné sústavy (Obr. 1.1):

1. Prvá trojfázová symetrická sústava, ktorá má rovnaký zmysel točenia fázorov ako pôvodná nesymetrická sústava ($\alpha=120^\circ$). Nazýva sa *súsledná sústava*.
2. Druhá trojfázová symetrická sústava, ktorá má rovnaký zmysel točenia fázorov ako pôvodná nesymetrická sústava, avšak so vzájomne prehodeným sledom dvoch fáz v porovnaní s prvou trojfázovou symetrickou sústavou ($\alpha=240^\circ$). Nazýva sa *spät-ná sústava*.
3. Tretia trojfázová symetrická sústava netočivých zložiek fázorov nesymetrickej sústavy. Tvoria ju tri fázory rovnako veľké s fázovým natočením $\alpha=360^\circ$. Tieto fázory z hla-

diska času majú frekvenciu základnej harmonickej nesymetrickej trojfázovej sústavy. Nazýva sa *netočivá sústava*.



Obr. 1.1 Rozklad nesymetrickej trojfázovej sústavy napätí na symetrické zložky

Ak máme trojfázovú sústavu napätí a prúdov, možno nesúmernú sústavu vyjadriť lineárnym transformačným vzťahom:

$$[\mathbf{U}_{abc}] = [\mathbf{T}_U] \cdot [\mathbf{U}_{012}] \quad [\mathbf{I}_{abc}] = [\mathbf{T}_I] \cdot [\mathbf{I}_{012}] \quad (1.1)$$

kde

$[\mathbf{T}_U], [\mathbf{T}_I]$ transformačné matice,
 $[\mathbf{U}_{abc}], [\mathbf{I}_{abc}]$ stĺpcové matice pôvodnej nesúmernej sústavy,
 $[\mathbf{U}_{012}], [\mathbf{I}_{012}]$ stĺpcové matice súmerných zložiek
 0 – netočivá, 1 – súsledná, 2 – spätná zložka.

Ak pre pôvodnú sústavu platí podľa Ohmovho zákona

$$[\mathbf{U}_{abc}] = [\mathbf{Z}_{abc}] \cdot [\mathbf{I}_{abc}] \quad (1.2)$$

potom v súmerných zložkách platí

$$[\mathbf{U}_{012}] = [\mathbf{Z}_{012}] \cdot [\mathbf{I}_{012}] \quad (1.3)$$

Pričom

$$[\mathbf{Z}_{abc}] = \begin{bmatrix} \dot{Z}_{aa} & \dot{Z}_{ab} & \dot{Z}_{ac} \\ \dot{Z}_{ba} & \dot{Z}_{bb} & \dot{Z}_{bc} \\ \dot{Z}_{ca} & \dot{Z}_{cb} & \dot{Z}_{cc} \end{bmatrix} \quad [\mathbf{Z}_{012}] = \begin{bmatrix} \dot{Z}_{00} & \dot{Z}_{01} & \dot{Z}_{02} \\ \dot{Z}_{10} & \dot{Z}_{11} & \dot{Z}_{12} \\ \dot{Z}_{20} & \dot{Z}_{21} & \dot{Z}_{22} \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

kde

$\dot{Z}_{aa}, \dot{Z}_{bb}, \dot{Z}_{cc}$ sú vlastné impedancie jednotlivých fázových vodičov,
 $\dot{Z}_{ab}, \dot{Z}_{ac}, \dot{Z}_{bc}$ sú vzájomné impedancie medzi jednotlivými fázovými vodičmi.

Jednoduchou úpravou dostaneme $[\dot{Z}_{012}]$ z matice $[\dot{Z}_{abc}]$.

$$\begin{aligned} [\mathbf{Z}_{012}] &= [\mathbf{U}_{012}] \cdot [\mathbf{I}_{012}]^{-1} = [\mathbf{T}_U]^{-1} \cdot [\mathbf{U}_{abc}] \cdot [\mathbf{I}_{abc}]^{-1} \cdot [\mathbf{T}_I] \\ &= [\mathbf{T}_U]^{-1} \cdot [\mathbf{Z}_{abc}] \cdot [\mathbf{T}_I] \end{aligned} \quad (1.5)$$

kde

$$[\mathbf{U}_{012}] = [\mathbf{T}_U]^{-1} \cdot [\mathbf{U}_{abc}], \quad [\mathbf{I}_{012}]^{-1} = [\mathbf{I}_{abc}]^{-1} \cdot [\mathbf{T}_I] \quad \text{a} \quad [\dot{Z}_{abc}] = [\mathbf{U}_{abc}] \cdot [\mathbf{I}_{abc}]^{-1}$$

Z rovníc (1.1), (1.2) a (1.3) vyplýva vzťah

$$[\mathbf{Z}_{012}] = [\mathbf{T}_U]^{-1} \cdot [\mathbf{Z}_{abc}] \cdot [\mathbf{T}_I] \quad (1.6)$$

kde

$$[\mathbf{T}_U] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \dot{a}^2 & \dot{a} \\ 1 & \dot{a} & \dot{a}^2 \end{bmatrix} \quad (1.7)$$

je transformačná matica, pričom \dot{a} je operátor

$$\dot{a} = e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}$$

Podrobnejšie o rozklade nesymetrickej sústavy na symetrické zložky hovorí [12].

Elektrické vedenie je z hľadiska konštrukcie statické zariadenie. Z toho dôvodu majú vedenia vždy súslednú a spätnú zložku impedancie rovnakú, teda platí:

$$\dot{Z}_1 = \dot{Z}_2 \quad (1.8)$$

Netočivá zložka impedancie \dot{Z}_0 je vždy väčšia ako súsledná zložka, pretože navyše tu prístupuje k odporom vodičov vedenia aj odpor zeme ako spätného vodiča. Teda pri dôslednej analýze, súčasťou slučky pre netočivú impedanciu je odpor zeme, odpor uzemňovacieho lana a odpory uzemnenia kovových stožiarov, ktoré sa radia paralelne k odporu zeme. Magnetický tok slučky vodič – zem (jednofázový skrat) je väčší, ako magnetický tok slučky vodič – vodič (medzifázový skrat), pretože aj prierez slučky vodič – zem je väčší.

Všeobecne pre symetrické impedancie teda platí

$$\frac{|\dot{Z}_0|}{|\dot{Z}_1|} \geq 1 \quad (1.9)$$

Znalosť symetrických zložiek impedancie vedení má veľký význam pre nastavenie dištančných ochrán, ako ochrán elektrických vedení. Hlavne v káblových mestských rozvodoch, kde sú elektrické vedenia pomerne krátke. V každom prípade, moderné dištančné ochrany musia byť nastavené presne, aby sa mohla využiť ich dobrá rozlišovacia schopnosť a schopnosť chrániť čo najväčšiu časť chráneného úseku.

1.1.1. Úloha č. 1

Vypočítajte $[U_{012}]$, ak, $\dot{U}_a = 230 \angle 0^\circ \text{ V}$, $\dot{U}_b = 235 \angle 0^{-125} \text{ V}$, $\dot{U}_c = 225 \angle 0^{+121} \text{ V}$.
 $[\dot{U}_0 = 6,89 \angle 179^\circ, \dot{U}_1 = 229,76 \angle -1,38^\circ, \dot{U}_2 = 8,99 \angle 36,85^\circ]$

Zdrojový kód symet.m (MatLab):

```
clear;
U_abc = [ 230.*exp(i*0); 235.*exp(i*(-deg2rad(125)));
225.*exp(i*(deg2rad(121))) ]
a = -1/2 + sqrt(3)/2*j
T_U = [
1, 1, 1;
1, a^2, a;
1, a, a^2;
]
absU_012 = abs((inv(T_U) * U_abc))
phiU_012 = rad2deg(angle((inv(T_U) * U_abc)))
```

1.1.2. Úloha č. 2

Vypočítajte $[U_{abc}]$, ak, $U_1 = 230 \text{ V}$, $U_2 = 15 \text{ V}$, $U_0 = 2 \text{ V}$.
 $[\dot{U}_a = 247 \angle 0 \text{ V}, \dot{U}_b = 221,7 \angle -123^\circ \text{ V}, \dot{U}_c = 221,7 \angle 123^\circ \text{ V}]$

Zdrojový kód nesymet.m (MatLab):

```
clear;
U_012 = [ 2; 230; 15]
a = -1/2 + sqrt(3)/2*j;
T_U = [
1, 1, 1;
1, a^2, a;
1, a, a^2;
];
T_U*U_012
absU_abc = abs(T_U*U_012)
phiU_abc = rad2deg(angle(T_U*U_012))
```

1.2. Meranie symetrických zložiek impedancií a kapacít elektrických vedení

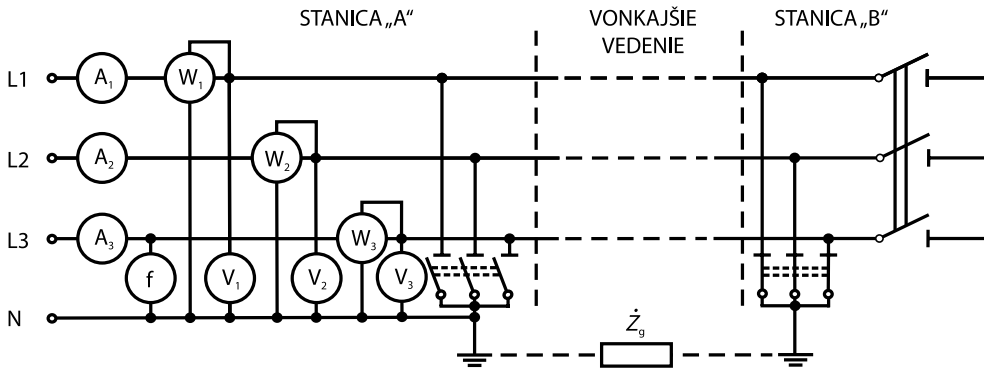
Pri nastavovaní elektrických ochrán, resp. pri rôznych výpočtoch elektrických sietí, kde sa používajú hodnoty elektrických parametrov vedení veľmi často, nie je možné sa spoliehať len na zaokrúhlené alebo vypočítané hodnoty. Napr. pre vzdušné 110 kV vedenia $X_1 = 0,4 \Omega / \text{km}$ a káblové vedenia $0,2 \Omega / \text{km}$. Tieto hodnoty sú jednak určené na základe určitých zjednodušujúcich predpokladov, na druhej strane v žiadnom výpočte nie je možné zohľadniť konkrétne prevádzkové podmienky (prechodové odpory spojok a spôsoby uloženia káblových vedení, neexistujúce transpozície (nerovnaká výška vodiča nad zemou a pod). Súslednú a netočivú zložku impedancie je potrebné merať aj z toho dôvodu, že sa tým vylúčia nepresnosti v určovaní dĺžky elektrických vedení, od ktorej značne závisí celková veľkosť elektrických parametrov.

Pri meraní parametrov je možné vždy použiť voltampérovú metódu merania impedancií v kombinácii s meraním výkonov v trojfázovej sieti, kvôli určeniu jednotlivých zložiek nameranej impedancie. Správnym zapojením meracieho obvodu je potom možné merať konkrétnu symetrickú zložku impedancie.

Veľkosť zdroja meracieho prúdu závisí od dĺžky meraného elektrického vedenia a od úrovne rušivých napätí. Čím je elektrické vedenie dlhšie, tým väčšiu má pozdĺžnu impedanciu a opačne. Preto na meranie dlhších vzdušných vedení (napr. vzdušné vedenie 110 kV s dĺžkou 50 km) je potrebné mať špeciálny trojfázový zdroj s napätím cca 1 kV. Na meranie kratších vedení často postačuje trojfázová zásuvka s napätím 400/230 V a pri meraní káblových vedení je potrebný zdroj s oveľa nižším napätím, vzhľadom na krátke dĺžky, značné prierezy a tým aj nízku hodnotu pozdĺžnej impedancie.

V prípade, že sa merajú parametre elektrických vedení, ktoré sú v tesnom súbehu s inými zaťaženými elektrickými vedeniami, vzniká problém rušenia merania indukovaným napätím. V takýchto prípadoch je potrebný trojfázový zdroj značného výkonu, pretože je nutné, aby meracím obvodom tiekol merací prúd, ktorý by potlačil úroveň rušenia. Výhodnejším riešením je použitie trojfázového zdroja s inou frekvenciou, ako je priemyselná frekvencia 50 Hz. Meracia frekvencia nesmie byť veľmi vzdialená od priemyselnej, pretože v podstate všetky elektrické parametre elektrických vedení sú frekvenčne závislé. Aby výsledkom merania v takom prípade boli dôveryhodné výsledky, je potrebný prepočet nameraných hodnôt na frekvenciu 50 Hz (pozri kap. 1.2.5). Meranie pri odlišnej frekvencii však kladie zvýšené nároky na meracie prístroje, ktoré musia byť selektívne. S výhodou je možné v týchto prípadoch použiť sieťové analyzátory (pozri kap. 1.2.8).

1.2.1. Meranie súslednej zložky impedancie vedenia – \dot{Z}_1



Obr. 1.2 Schéma zapojenia prístrojov a usporiadanie obvodu pre meranie súslednej zložky impedancie vedenia

Postup pri meraní a spracovanie nameraných výsledkov

Merané elektrické vedenie je v beznapäťovom stave na oboch koncoch (pre zaisťovanie bezpečnosti pracoviska pri meraní). V stanici A sa zapoja meracie prístroje podľa schémy k meranému vedeniu (napr. cez skratovaciu súpravu na nože vývodového odpájača). Uzemňovacie nože vývodového odpájača sú rozpojené. V stanici B sú rozpojené hlavné nože vývodového odpájača a uzemňovacie nože sú spojené (elektrické vedenie je vyskratované a uzemnené). Týmto je realizovaná vyššie uvedená schéma pre vedenie pre trojfázovom skrate so zemou na konci vedenia.

Pri meraní sa merané vedenie pripojí k zdroju regulovateľného trojfázového napätia. Reguláciou napätia sa pre všetky tri fázy nastaví rovnaké napätie na zdroji, ktorý takto tvorí symetrickú napájaciu sústavu. Meranie sa vykoná pri viacerých hodnotách napájacieho napätia. V prípade, že pri meraní sú potrebné vyššie hodnoty napätia a prúdu, meracie prístroje sa zapoja z pochopiteľných dôvodov cez prístrojové transformátory napätia a prúdu.

Absolútna veľkosť súsledných zložiek impedancií \dot{Z}_{1L1} , \dot{Z}_{1L2} , \dot{Z}_{1L3} sa vypočíta podľa vzťahu

$$Z_1 = \frac{U}{I} \quad (\Omega; \text{V}, \text{A}) \quad (1.10)$$

kde

U – údaj voltmetra v príslušnej fáze,

I – údaj ampérmetra v príslušnej fáze.

Pokiaľ trojfázové vedenie obsahuje transpozície vodičov, je teda symetrické, súsledné zložky impedancie vodičov sú teoreticky rovnaké. Pri rozdielnych hodnotách sa súsledná zložka impedancie vedenia určí ako aritmetický priemer impedancií jednotlivých fáz

$$Z_1 = \frac{1}{3} \cdot (Z_{1L1} + Z_{1L2} + Z_{1L3}) \quad (\Omega) \quad (1.11)$$

Veľkosť uhla súslednej zložky impedancie sa určí postupne z merania činného výkonu jednotlivých fáz

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (-; W, VA) \quad (1.12)$$

$$P = P' - \Delta P \quad (W; W, W) \quad (1.13)$$

$$S = U \cdot I \quad (VA; V, A) \quad (1.14)$$

kde

P' – činný výkon odčítaný z wattmetra príslušnej fázy,

P – činný výkon na vedení,

S – zdánlivý výkon na vedení,

U – údaj voltmetra príslušnej fázy,

I – údaj ampérmetra príslušnej fázy.

Straty činného výkonu na napäťových cievkach meracích prístrojov sú

$$\Delta P = U^2 \cdot \left(\frac{1}{R_{vV}} + \frac{1}{R_{vW}} \right) \quad (W; V, \Omega, \Omega) \quad (1.15)$$

kde

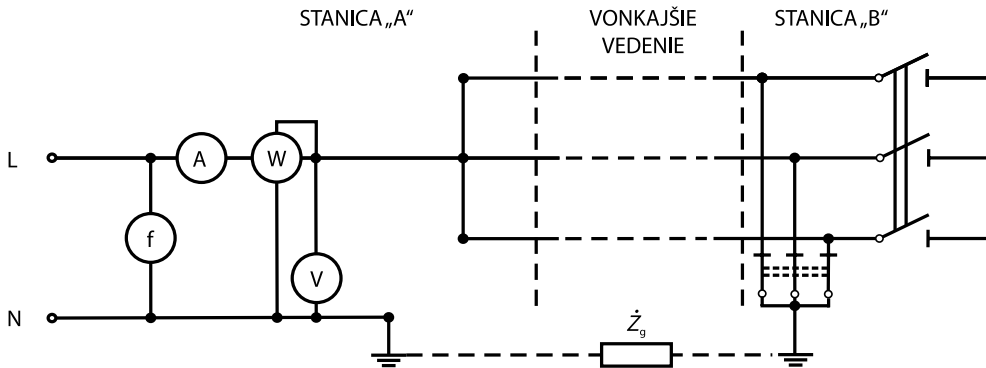
R_{vV} , resp. R_{vW} odpor napäťovej cievky voltmetra, resp. wattmetra príslušnej fázy,
 U údaj voltmetra príslušnej fázy.

Jednotlivé zložky súslednej impedancie sa vypočítajú

$$R_1 = Z_1 \cdot \cos \varphi \quad (\Omega; \Omega, -) \quad (1.16)$$

$$X_1 = Z_1 \cdot \sin \varphi \quad (\Omega; \Omega, -) \quad (1.17)$$

1.2.2. Meranie netočivej zložky impedancie vedenia – \dot{Z}_0



Obr. 1.3 Schéma zapojenia prístrojov a usporiadanie obvodu pre meranie netočivej zložky impedancie vedenia

Postup pri meraní a spracovanie nameraných výsledkov

Pri meraní podľa schémy zapojenia sú v stanicích A a B všetky fázové vodiče vyskratované a v stanici B sú uzemňovacie nože vývodového odpájača uzemnené.

Pripojením netočivých zložiek napätia k trojfázovému vedeniu, teda pripojením k jednotlivým fázam vedenia troch rovnakých napätí (rovnaká veľkosť aj fáza), pričom prúd sa uzatvára zemou ako spätným vodičom, bude netočivá zložka impedancie vedenia daná vzťahom

$$\dot{Z}_0 = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \dot{Z}_1 + 3 \cdot \dot{Z}_g \quad (1.18)$$

Pri meraní podľa Obr. 1.3 sú aj v stanici A, aj v stanici B všetky tri fázové vodiče vyskratované, a preto celková súsledná impedancia vedenia je $\dot{Z}_1/3$. V stanici B sú cez uzemňovacie nože vývodového odpájača všetky tri fázy uzemnené, a preto sa merací prúd k zdroju uzatvára cez impedanciu zeme meraného vedenia \dot{Z}_g . Pri tomto spôsobe merania meriame len jednu tretinu netočivej zložky impedancie, a preto platí

$$\frac{\dot{Z}_0}{3} = \frac{\dot{Z}_1}{3} + \dot{Z}_g \quad (1.19)$$

Absolútna veľkosť netočivej zložky impedancie vedenia sa určí zo vzťahu

$$Z_0 = \frac{3 \cdot U}{I} \quad (\Omega; \text{V}, \text{A}) \quad (1.20)$$

kde

U – údaj voltmetra,

I – údaj ampérmetra.

Veľkosť uhla netočivej zložky impedancie sa určí z wattmetrického merania

$$\cos \varphi_0 = \frac{P}{S} \quad (-; W, VA) \quad (1.21)$$

pričom pre P a S platia vzťahy (1.13) a (1.14) (pozri kap.1.2.1).

Zložky netočivej impedancie sa určia nasledovne

$$R_0 = Z_0 \cdot \cos \varphi_0 \quad (\Omega; \Omega, -) \quad (1.22)$$

$$X_0 = Z_0 \cdot \sin \varphi_0 \quad (\Omega; \Omega, -) \quad (1.23)$$