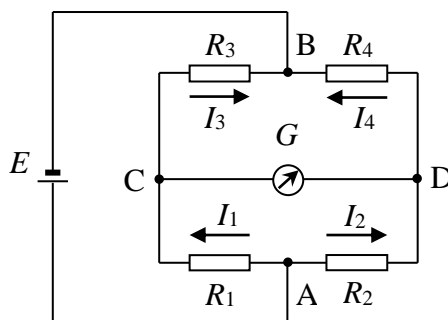


4.3. Mostne metode

4.3.1. Jednosmerni Vitstonov most

Merni mostovi su električna kola koja omogućuju neposredno poređenje poznatih i nepoznatih veličina koristeći indikator koji se dovodi na nulu ručnim ili automatskim podešavanjem poznatih veličina. Merne metode koje koriste merne mostove se nazivaju mostne metode.

Osnovni merni most je Vitstonov most (Wheatstone). Na slici 4.3.1 je predstavljen osnovni oblik jednosmernog Vitstonovog mosta¹⁾.



Slika 4.3.1 Jednosmerni Vitstonov most

Četiri različita otpornika spojena su u četiri "grane" mosta. Na jednu dijagonalu mosta (AB) dovodi se jednosmerni napon E , a u drugu, tzv. mernu dijagonalu (CD) povezan je osetljiv instrument (indikator nule). Ovaj instrument mora biti dovoljno osetljiv i imati dovoljan otklon za male promene otpornosti u mostu kako bi ova metoda merenja imala odgovarajuću tačnost.

Napon na mernoj dijagonali u kojoj se nalazi instrument u funkciji vrednosti četiri otpornika izračunava se kao

$$V_G = E \frac{R_2 R_3 - R_1 R_4}{(R_1 + R_3)(R_2 + R_4)} \quad (4.3.1)$$

Ravnoteža mosta postiže se kada je struja kroz granu sa indikatorom jednaka nuli, $I_G = 0$. U tom slučaju nema pada napona na instrumentu pa su naponi na otpornicima R_1 i R_2 jednaki, kao i naponi na otpornicima R_3 i R_4 , odakle se dobija da je

¹⁾ Interesantno je spomenuti da Vitstonov most nije pronašao Čarls Vitston (Charles Wheatstone) po kome on danas nosi naziv, već Hanter Kristi (Hunter Christie) 1843. Vitston je na svojim predavanjima i u radovima koje je objavljivao i sam pripisivao zasluge Kristiju. Međutim, Vitston je ovo kolo proslavio i učinio poznatim širim naučnim krugovima, pa su ga svi počeli zvati Vitstonov most. Sam Vitston je ovo kolo zvao "diferencijalno merilo otpornosti". Vitston je, takođe, zaslužan za način prikazivanja mosta u vidu romboidnog razmeštaja četiri otpornika, baterije i galvanometra, za šta je inspiraciju dobio gledajući ornamente na svom plavom kineskom porcelanu iz koga je pio čaj dok je razmišljao o nauci.

$$I_1 = I_3 \quad (4.3.2)$$

$$I_2 = I_4 \quad (4.3.3)$$

Na taj način se uslov ravnoteže mosta svodi na relaciju 4.3.4.

$$R_1 R_4 = R_2 R_3 \quad (4.3.4)$$

Za most, kod koga važi da su struja i napon merne dijagonale jednaki nuli, kaže se da je uravnotežen. Kao indikator nule u uravnoteženom mostu može se koristiti instrument skromnih mogućnosti s obzirom da njegova unutrašnja otpornost i druga konstrukciona ograničenja ne utiču bitno na proces merenja. Osim toga, uravnotežen most ima mnoge prednosti u merenjima, kao što je, recimo, činjenica da uslov ravnoteže mosta ne zavisi od napona napajanja, odnosno da most ostaje u ravnoteži i ako se za napajanje koriste baterije ili akumulatorski izvori čija struja i napon vremenom slabe.

Najjednostavnija realizacija uravnoteženog jednosmernog Vitstonovog mosta dobija se kada su svi otpornici u granama mosta jednaki (izraz 4.3.5).

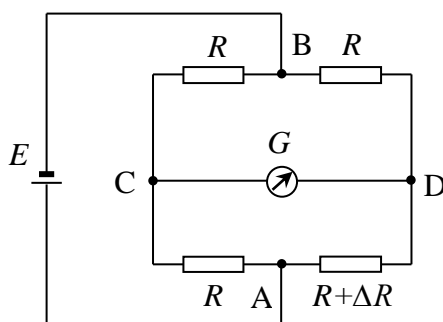
$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R \quad (4.3.5)$$

Ukoliko neka od otpornosti odstupa od ove vrednosti i promeni se za malu vrednost ΔR (kao u 4.3.6), napon na mernoj dijagonali će se razlikovati od nule i iz vrednosti ovog napona može se izračunati vrednost promene ove otpornosti. Ovakav most neće imati nulti napon u mernoj dijagonali i naziva se neuravnotežen most.

Neka je

$$R_2 = R + \Delta R \quad (4.3.6)$$

Na slici 4.3.2 prikazan je odgovarajući neuravnotežen most.



Slika 4.3.2. Merenje relativne promene otpornosti pomoću Vitstonovog mosta

Zavisnost napona merne dijagonale od promene otpornosti ΔR može se izraziti kao u 4.3.7.

$$V_G = E \frac{\Delta R}{4R + 2\Delta R} \quad (4.3.7)$$

Ukoliko je ispunjen uslov da je promena mnogo manja od ukupne vrednosti otpornosti ($\Delta R \ll R$), izraz 4.3.7 može se pojednostaviti i svesti na 4.3.8.

$$V_G = \frac{E}{4} \frac{\Delta R}{R} \quad (4.3.8)$$

Ovo se može interpretirati i na sledeći način: ako se želi meriti otpornost R sa greškom manjom od $\pm\Delta R$, onda odgovarajuća promena otpornosti R za ΔR mora izazvati jasno uočljivu promenu indikatora u okolini ravnotežnog stanja, tj. mora se postići zadovoljavajuća osetljivost mosta.

Neuravnoteženi merni mostovi moraju imati kvalitetne indikatore nule (za voltmetarske indikatore poželjno je da im je otpornost što veća, a za strujne što manja) i stabilne izvore napajanja, jer na osnovu 4.3.8 sledi da vrednost napona napajanja E utiče na očitavanje rezultata.

Strogo rečeno, osetljivost mosta O u odnosu na neki parametar predstavlja odnos promene struje ili napona merne dijagonale i promene tog parametra.

Tako je npr. osetljivost mosta sa voltmetrom u mernoj dijagonali na promenu otpornosti definisana izrazom 4.3.9 i ima dimenziju V / Ω ili, češće, mV / Ω (pri tome ne dolazi do skraćivanja jedinica, iako je formalno volt po omu isto što i amper).

$$O_R(R) = \frac{\Delta V_G}{\Delta R} \left(\frac{mV}{\Omega} \right) \quad (4.3.9)$$

Kada se u mernoj dijagonali kao detektor nule koristi galvanometar (veoma osetljivi mikroampermetar), tada je osetljivost na promenu otpornosti u nekoj grani data sa 4.3.10.

$$O_R(R) = \frac{\Delta I_G}{\Delta R} \left(\frac{\mu A}{\Omega} \right) \quad (4.3.10)$$

Na sličan način izraz 4.3.11 definiše osetljivost mosta u odnosu na promenu napona napajanja.

$$O_E(E) = \frac{\Delta V_G}{\Delta E} \left(\frac{mV}{V} \right) \quad (4.3.11)$$

U praksi se pod osetljivošću mosta ipak najčešće podrazumevaju veličine definisane izrazima 4.3.9 i 4.3.10, odnosno zavisnost promene pokazivanja indikatora nule od promene otpornosti s obzirom da je upravo otpornost veličina koja je predmet merenja. Osetljivost mosta definisana na ovaj način, ima najveću vrednost u okolini ravnoteže mosta i nultog položaja indikatora, odnosno kaže se da je merni most najosetljiviji u okolini nule. Pored ovih parametara može se definisati i osetljivost na promenu temperature, zatim osetljivost na strane napone i sl.

Značaj neuravnoteženih mostova je sve veći u modernim uređajima sa kablovskim mernim mostovima (npr. Minibridge proizvođača Hagenuk KMT). Ove mostove karakteriše velika brzina rada, što je bio jedan od glavnih nedostataka uravnoteženih mostova, kod kojih je bilo potrebno ručno nameštati ravnotežu mosta (KMK 6) ili čekati da uređaj automatski podesi mehaničke potencioetre (KMK 7), što zahteva dosta vremena i nije praktično kod masovnih merenja. Kod neuravnoteženih mostova rezultat se direktno očitava sa postojećeg indikatora bez dodatnih intervencija korisnika. Time se znatno ubrzava postupak merenja i prave velike uštede u održavanju.

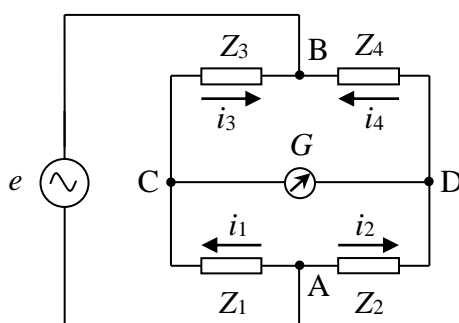
Sama izvedba neuravnoteženog mosta je jednostavnija, jer nema uravnotežavajućih elemenata, ali je potreban složeniji i kvalitetniji indikator nule nego kod Vitstonovog mosta. Nedostatak neuravnoteženih mostova je što su osetljivi na velik broj parametara, kako napajanja tako i promene veličine koja se meri. Kako je najveća osetljivost u okolini nule, za velika odstupanja gubi se na tačnosti izmerene vrednosti, što je još jedna mana u odnosu na uravnotežene mostove, koji su generalno tačniji.

Srećom, napredak tehnologije omogućava sve bolje indikatore, tako da danas mnogi uređaji koriste upravo neuravnoteženi most, koji tako obezbeđuje povoljan odnos (kompromis) između vremena merenja, cene i tačnosti.

4.3.2. Naizmeničan Vitstonov most

Naizmenični mostovi omogućavaju međusobno poređenje kompleksnih impedansi koje u sebi mogu sadržati kapacitivne i induktivne elemente, nasuprot čistim otpornostima kod jednosmernih mostova. Otpornike R u granama mosta zamenjuju kompleksne impedanse $Z = R + jX$, (gde je j označena imaginarna jedinica), a jednosmerni izvor menja se naizmeničnim.

Opšti primer naizmeničnog Vitstonovog mosta je dat na slici 4.3.3.



Slika 4.3.3. Naizmenični Vitstonov most

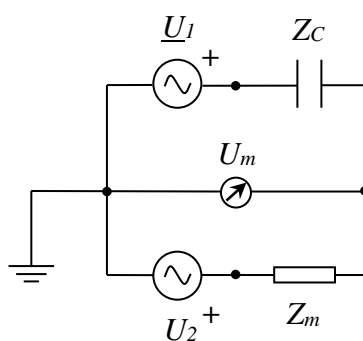
Uslov ravnoteže naizmeničnog mosta dat je izrazom 4.3.12.

$$\underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_4 = \underline{Z}_2 \cdot \underline{Z}_3 \quad (4.3.12)$$

4.3. Mostne metode

Iako, na prvi pogled, ovaj uslov izgleda identičan onom datom u 4.3.4, izraz 4.3.12 zapravo u sebi krije dve jednakosti: jednakost po amplitudi i jednakost po fazi, s obzirom da su Z_1 , Z_2 , Z_3 i Z_4 , kompleksne veličine. Ovo ima za posledicu da je u mernoj dijagonali potrebno posedovati tzv. vektorski indikator nule, tj. instrument koji je u mogućnosti da detektuje i amplitudu i fazu napona između tačaka C i D. Zbog ovoga je uravnotežavanje naizmeničnih mernih mostova veoma zahtevan posao koji se ručnim postupkom izvodi u mnogo iteracija.

Ako se umesto pasivnih impedansi u dve grane mosta stave naizmenični izvori čiji se međusobni fazni pomeraj može dobro kontrolisati (tzv. dvokanalni izvori), tada se naizmenični most može svesti na šemu datu slikom 4.3.4.



Slika 4.3.4. Aktivan naizmenični most

Z_C je opšti izraz impedanse za kondenzator mada u ovoj grani može stajati bilo koja impedansa, dok se dva izvora kompleksno predstavljaju izrazima 4.3.13 i 4.3.14.

$$\underline{U}_1 = U_1 \quad (4.3.13)$$

$$\underline{U}_2 = U_2 e^{j\varphi_2} \quad (4.3.14)$$

gde su U_1 i U_2 efektivne vrednosti (kompleksne amplitude) naponskih izvora, a φ_2 je ugao za koji je faza drugog izvora pomerena u odnosu na prvi. Uslov ravnoteže ovog mosta je isti, da nema struje kroz mernu granu tj. da je na indikatoru nulti napon $U_m = 0$ V, pa se 4.3.12 svodi na 4.3.15.

$$Z_m = -Z_C \frac{U_2}{U_1} \quad (4.3.15)$$

Ako obezbedimo da su merena impedansa i impedansa Z_C približno jednake, ravnoteža mosta se postiže samo podešavanjem odnosa amplituda i faza izvora.

$$Z_m = -Z_C \cdot \frac{U_2}{U_1} e^{j\varphi_2} \quad (4.3.16)$$

U mnogim savremenim aktivnim mernim mostovima, naponi U_1 i U_2 se sintetišu digitalno, a kako je i instrument u dijagonali najčešće digitalni voltmetar, veoma jednostavno je uvesti automatsku kontrolu i samoregulaciju digitalnim logičkim kolima i procesorima. Mostovi koji

4.3. Mostne metode

imaju izgrađenu samoregulacionu povratnu spregu za dovođenje amplitude i faze napona merne dijagonale na nulu podešavanjem izvora U_1 i U_2 , nazivaju se samouravnotežavajući aktivni merni mostovi.

Odavde sledi da indikator nule mora imati kvalitetan detektor faze kako bi prosledio dovoljno tačnu informaciju uređaju za regulaciju i povratnoj sprezi ka izvorima. Takođe je kod ovih mostova moguće definisati osetljivost, kao i kod jednosmernih, ali je sada osetljivost dualan pojam i deli se na osetljivost faze i osetljivost amplitude merne dijagonale na promenu nekog parametra.

Drugi tip samouravnotežavajućih mostova koristi podesive pasivne komponente, najčešće potenciometre, i elektromehaničke elemente, kao što su elektromotori, za njihovo podešavanje. Primer ovakvog mosta je KMK 7 proizvođača Hagenuk KMT. Samouravnotežavajući mostovi sa motornim uravnoteženjem su veoma spori, jer je pri svakoj promeni smera uravnoteženja neophodno sačekati da se motor zaustavi, a potom i zarotira u drugom smeru. Sporost ovh mostova može predstavljati ozbiljan problem kod masovnih merenja koja se zahtevaju npr. kod prijema linija.

Samouravnotežavajući mostovi su veoma pouzdani i efikasni u merenju nepoznatih impedansi. Imaju veliku osetljivost i nisku cenu zahvaljujući relativno jednostavnom digitalnom hardveru. Zbog toga se za merenja na pristupnoj mreži, danas u najvećem broju slučajeva koriste upravo samouravnotežavajući mostovi, bilo aktivni, bilo pasivni.

Merni mostovi primenjeni na merenja u pristupnoj mreži se popularno nazivaju kablovski merni mostovi. Pri tome, ovi mostovi ne moraju uvek biti naizmenični, pa čak ni uravnoteženi.

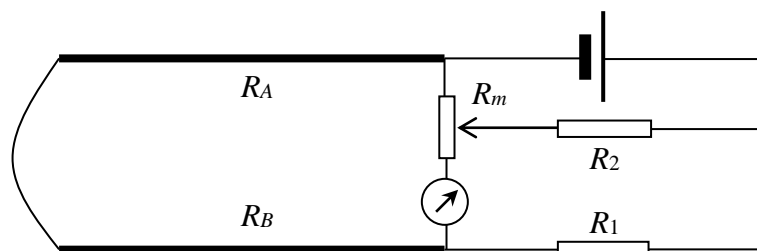
4.3.3. Pripremna merenja za mostne metode

Kako je tačnost lociranja smetnji pomoću klasičnih mernih mostova ograničena, realizovane su posebne metode lociranja smetnji koje koriste Vitstonov most uz izvesne modifikacije. Najčešće primenjene mostne metode lociranja smetnji su Marejev (Murray) most, Kipfmilerova (Kipfmiller) metoda, Grafova (Graff) metoda i Fišerova (Fisher) metoda, a ređe Varlijev (Varley) most i modifikovana Hektorova (Hector) metoda za slučaj merenja jednosmernom strujom. Za slučaj merenja naizmeničnom strujom, odnosno impulsima jednosmerne struje, koristi se most za lociranje prekida. Ovome treba dodati i metodu lociranja mesta smetnje povećane prelazne otpornosti.

Pomoću gore navedenih mostnih metoda moguće je, između ostalog, locirati smetnje kratkog spoja i mesta prekida. Međutim, da bi se ove mostne metode mogle uspešno primeniti, neophodno je obaviti izvesna pripremna merenja. Tako je, npr. za lociranje smetnje kratkog spoja potrebno imati podatak o otpornosti petlje, dok je za lociranje mesta prekida potreban rezultat merenja kapacitivnosti parice. Pored toga, kod mostnih metoda je potrebno poznavati asimetriju u žilama, pa je neophodan i podatak o razlici otpornosti ovih žila.

4.3.3.1. Merenje otpornosti petlje

Ukupna otpornost parice, između ostalog, zavisi i od učestanosti naizmjenične struje. Međutim, merenje otpornosti petlje u pristupnoj mreži izvodi se isključivo jednosmernom strujom. Postoji više metoda merenja otpornosti od kojih su najrasprostranjenije U-I metode i mostne metode. Ako se zanemari ispitni ormarić (U-I metoda), najrasprostranjeniji pristup merenju otpornosti petlje u pristupnoj mreži Telekom Srbija je korišćenje Vitstonovog mosta koji je sastavni deo univerzalnog kablovskog mernog mosta. Princip rada se može videti sa slike 4.3.5.



Slika 4.3.5. Most za merenje otpornosti petlje

Otpornost petlje R_{AB} dat je kao zbir otpornost žila a i b .

$$R_{AB} = R_A + R_B \quad (4.3.17)$$

U skladu sa 4.3.4, jednačina ravnoteže mosta sa slike 4.3.5. ima oblik 4.3.18.

$$R_{AB} = R_m \frac{R_1}{R_2} \quad (4.3.18)$$

Važno je napomenuti da je, u slučaju postojanja polarizacionih, termo ili bilo kakvih stranih napona u petlji, korisno zameniti smer toka struje kroz paricu. Ovo se može izvesti ili zamenom mesta žila na priključnicama ili komandama na prednjoj ploči instrumenta. Stvarna vrednost otpornosti petlje se u tom slučaju dobija kao aritmetička sredina izmerenih vrednosti (izraz 4.3.19).

$$R_{AB}^* = \frac{R_{AB} + R_{BA}}{2} \quad (4.3.19)$$

Pri tome su R_{AB} i R_{BA} otpornosti petlje izmerene za različite smerove struja kroz paricu.

Interesantno je sagledati ulogu kontrole otpornosti petlje zavisno od materijala izolacije žila kabla. Naime, kod kablova sa vazdušno-papirnom izolacijom u slučaju prodora vlage u kabl će do ispada doći usled pojave odvoda, dok će u slučaju kabla sa termoplastičnom izolacijom žila, najčešće pre doći do omskog diskontinuiteta sve do prekida ukoliko je ugrožen nastavak. Merenjem otpornosti pomoću mostnih metoda moguće je odrediti ukupnu dužinu parice kao i približno predlociranje mesta smetnje kratkog spoja ili dodira koristeći podatak o podužnoj otpornosti R' (Ω / m) po obrascu 4.3.20.

$$L_x = \frac{R_x}{R'} \quad (4.3.20)$$

4.3. Mostne metode

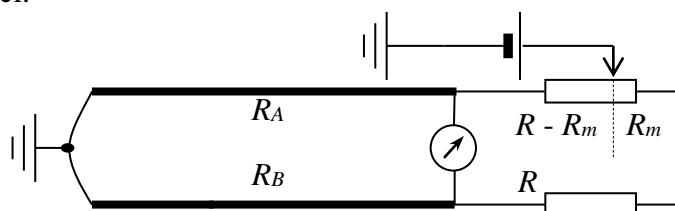
Greška koja se čini je neizvesna zbog neizvesnosti u pogledu veličine prelazne otpornosti na mestu smetnje, tako da dobijeni rezultat predstavlja najveću dužinu u okviru koje se nalazi mesto smetnje.

4.3.3.2. Merenje razlike otpornosti

Merenje razlike otpornosti može se izvesti merenjem otpornosti u pojedinačnim žilama i izračunavanjem razlike. Znatno manja greška merenja ostvaruje se korišćenjem savremenog namenskog mernog mosta koji je sastavni deo univerzalnog kablovskog mernog mosta. Postoji više konfiguracija mernih mostova za merenje razlike otpornosti. Na slikama 4.3.6 i 4.3.7 prikazane su dve varijante.

Varijanta A

U ovoj varijanti se u referentnim granama mosta potencijetrom pokušava ostvariti isti debalans kao i na parici.



Slika 4.3.6. Varijanta A merenja razlike otpornosti

Jednačina ravnoteže za varijantu A ima oblik 4.3.21.

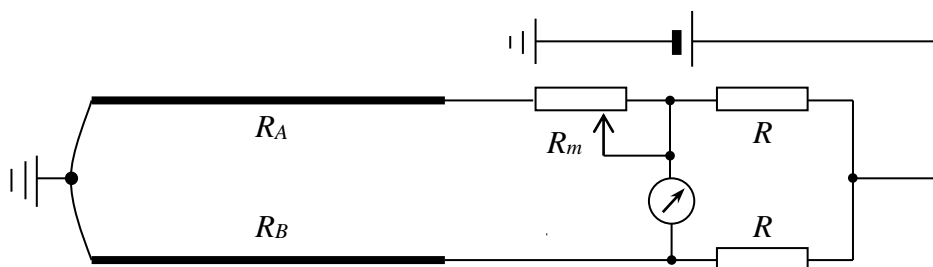
$$\frac{R + R_m}{R_B} = \frac{R - R_m}{R_A} \quad (4.3.21)$$

Odavde se lako dobija da je razlika otpornosti data izrazom 4.3.22.

$$\Delta R = R_B - R_A = R_{AB} \frac{R_m}{R} \quad (4.3.22)$$

Jasno je da je za ovu varijantu nepohodno imati prethodno izmerenu vrednost otpornosti petlje.

Varijanta B



Slika 4.3.7. Varijanta B merenja razlike otpornosti

4.3. Mostne metode

U varijanti B se u referentnim granama nalaze identični otpornici, dok se razlika otpornosti koja postoji na parici, kompenzuje ubacivanjem dodatne otpornosti potencijometra.

Jednačina ravnoteže u varijanti B ima oblik 4.3.23.

$$\frac{R_A + R_m}{R} = \frac{R_B}{R} \quad (4.3.23)$$

Sređivanjem se dobija izraz 4.3.24.

$$\Delta R = R_B - R_A = R_m \quad (4.3.24)$$

Merenje razlike otpornosti je moguće izvesti i pomoću Marejeve mostne metode koja će biti kasnije opisana.

4.3.3.3. Merenje kapacitivnosti

S obzirom na uticaj i međuzavisnost kapacitivnosti i drugih električnih veličina kao što su napon, učestanost, vreme, faza itd., razvijene su mnogobrojne metode merenja kapacitivnosti. Ovde će biti prikazana varijanta mosta primenjenog kod univerzalnog kablovskog mernog mosta KMK 6, čija je šema data na slici 4.3.8.

Uvođenjem smena datih u 4.3.25

$$Z = \frac{R}{1 + j\omega CR}$$

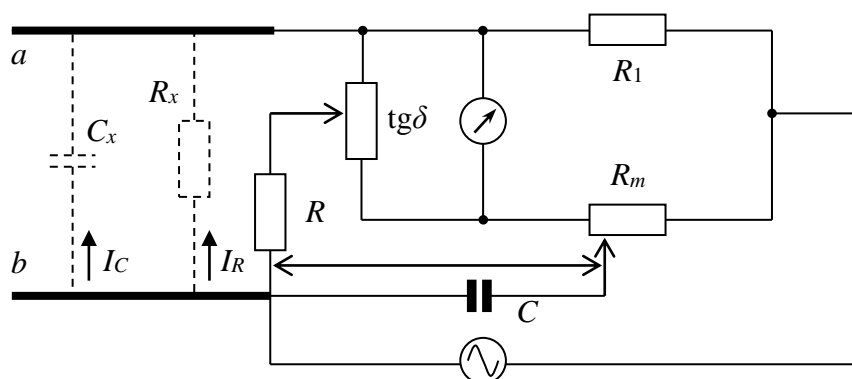
$$Z_x = \frac{R_x}{1 + j\omega C_x R_x} \quad (4.3.25)$$

$$Z_m = R_m$$

$$Z' = R'$$

jednačina ravnoteže mosta svodi se na 4.3.26.

$$Z'Z = Z_x Z_m \quad (4.3.26)$$



Slika 4.3.8. Povezivanje mosta u kolo za merenje kapacitivnosti

Nakon zamene, sređivanja i izjednačavanja realnog i imaginarnog dela jednakosti 4.3.26, dobijaju se izrazi 4.3.27 i 4.3.28.

$$R_x = R \frac{R_1}{R_m} \quad (4.3.27)$$

$$C_x = C \frac{R_m}{R_1} \quad (4.3.28)$$

U ovoj varijanti je parica kao realan kondenzator predstavljena paralelnom vezom čiste kapacitivnosti C_x i otpornosti R_x . Odnos struja I_R / I_C predstavlja tangens ugla gubitaka i označava se sa $\text{tg}\delta$. Očigledno je da, što je $\text{tg}\delta$ manji, odnosno paralelna otpornost veća, to je izolacija savršenija.

Most se napaja naizmjeničnom strujom i koristi se za merenje kapacitivnosti nepupinovanih kablova dužine do 5 km. Merenje kapacitivnosti na pupinovanim kablovima i kablovima dužim od 5 km se obavlja naizmjeničnom strujom znatno niže učestanosti ili impulsima jednosmerne struje. Za merenje se koristi isti most, samo mu je konfiguracija izmenjena utoliko što je realni kondenzator predstavljen rednom vezom čiste kapacitivnosti C_x i otpornosti R_x .

Na osnovu rezultata merenja kapacitivnosti parice može se odrediti njena ukupna dužina kao i dužina do mesta prekida uz korisćenje podatka o podužnoj kapacitivnosti C' (pF/m) po obrascu 4.3.29.

$$l_x = \frac{C_x}{C'} \quad (4.3.29)$$

Ukupna kapacitivnost parice se sastoji od kapacitivnosti između samih provodnika i kapacitivnosti između pojedinačnih provodnika i ekrana. Kapacitivnosti između pojedinačnih provodnika i ekrana bi po pravilu trebalo da budu isti, ali to u praksi nije slučaj. Mera ove neusaglašenosti je kapacitivna asimetrija. Merenje kapacitivne asimetrije se izvodi Marejevim mostom, s tom razlikom što se za napajanje koristi naizmjenična struja, a suprotan kraj parice je otvoren.

4.3.4. Varlijev most

Primena Varlijevog mosta je najstarija kablovska mostna metoda razvijena još za telegrafске linije²⁾. Ovde se predstavlja samo iz istorijskih razloga, kao prva metoda razvijena za predlociranje mesta smetnje na kablovskim instalacijama.

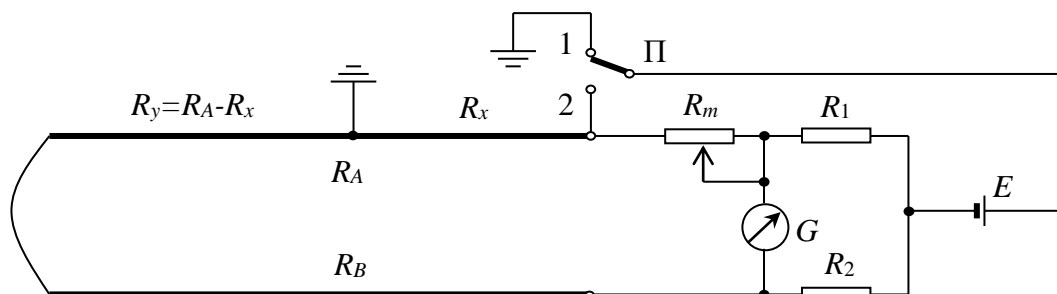
Ova metoda je pogodna za primenu na kablovima sa velikom otpornošću žila. Kako je tendencija modernih telekomunikacionih sistema da se otpornost bakarnih parica smanjuje,

²⁾ Pojam "Varlijev most" je širim krugovima ljudi daleko poznatiji kao zajednički naslov nekoliko dela iz skupocene serije akvarela američkog slikara Frederika Horsmana Varlija (Frederick Horsman Varley) nastalih u periodu 1932-1935.

4.3. Mostne metode

Varlijev most sve više gubi na značaju i masovno se primenjuje samo u postupcima određivanja razlike otpornosti.

Šematski prikaz Varlijevog mosta je dat na slici 4.3.9.



Slika 4.3.9. Varlijev mosta za predlociranje smetnji

Jednačina ravnoteže za slučaj preklopnika u položaju 1 je 4.3.30.

$$\frac{R_1}{R_{m1} + R_x} = \frac{R_2}{R_A + R_B - R_x} \quad (4.3.30)$$

Ako je $R_1 = R_2 = R$, i ako je vod homogen ($R_A = R_B$, $R_A + R_B = R_{AB}$ i $2R_x = r_x$), tada su vrednosti merene otpornosti i mesta smetnji dati izrazima 4.3.31 i 4.3.32.

$$r_x = R_{AB} - R_{m1} \quad (4.3.31)$$

$$l_x = l \frac{R_{AB} - R_{m1}}{R_{AB}} \quad (4.3.32)$$

Vrednost otpornosti petlje se istim ovim mostom može izmeriti prebacivanjem preklopnika u položaj 2 i uravnoteženjem mosta, nakon čega se dobija 4.3.33.

$$R_{AB} = R_{m2} \quad (4.3.33)$$

Osnovna prednost primene Varlijevog mosta je ta što nema plutajućih potencijala na krajevima instrumenta jer su otpornici u dve grane stalni. Da bi Varlijeva metoda dala zadovoljavajuće rezultate potrebno je da potenciometar ima što veći broj podeoka (10.000 ili više). Ako bi potenciometar imao malu otpornost tada bi bila mala razlika između dva različita položaja klizača, pa bi most bio previše osetljiv. Tipične vrednosti potenciometra u današnjim instrumentima iznose oko 1 k Ω . Ovako velika otpornost ubačena u granu a dominira u odnosu na otpornost petlje, pa se zadovoljavajuća tačnost može postići samo ako je i sama parica takva da ima veliku otpornost žila.

Ako su stalni otpornici R_1 i R_2 isti, tada je rezolucija merenja Varlijevim mostom znatno veća za smetnje koje su blizu instrumenta, nego za smetnje koje se nalaze daleko, jer je potenciometar ubačen u granu sa smetnjom, čime je mesto smetnje "odmaknuto" od instrumenta. Međutim, rezolucija se može podešavati promenom odnosa stalnih otpornika. Umesto da se uzmu isti otpornici, namesti se da im je odnos 1:10 ili 1:100. Dodatna mana

4.3. Mostne metode

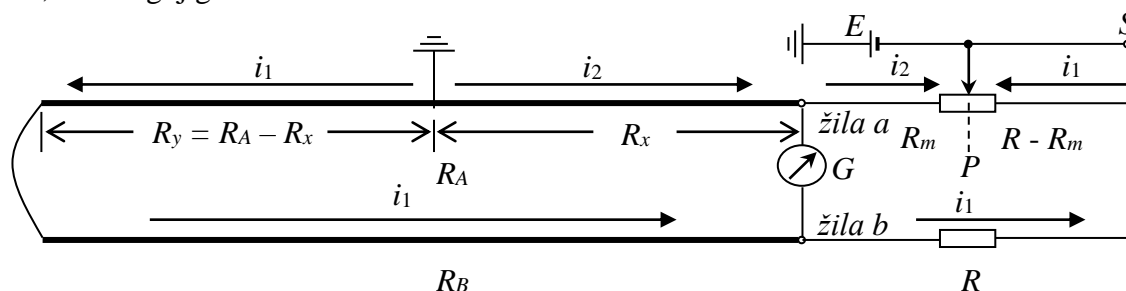
Varlijevog mosta je ta što jedino može meriti niskoomske smetnje. Pored toga samo jedna žila može biti u dodiru sa zemljom, odnosno mora postojati druga ispravna žila.

Ako se greškom, ispravna žila priključi na a (umesto na b), tada se most nikada neće uravnotežiti, pa se gubi puno vremena dok se to shvati, što je nepovoljno za masovna merenja.

4.3.5. Marejev most

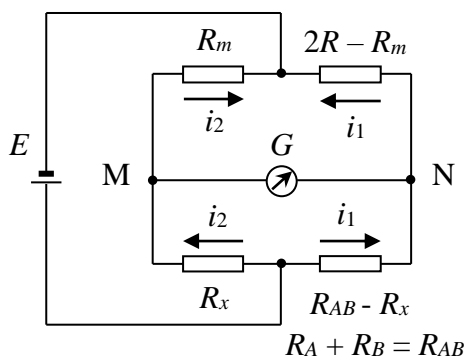
Za savremene kablove, koji imaju malu otpornost žila, daleko je povoljnija primena Marejevog mosta³⁾. Njegova principska šema data je na slici 4.3.10.

Most se sastoji iz žile sa greškom otpornosti R_A i ispravne žile otpornosti R_B koje su na suprotnom kraju kratko spojene. Za uravnoteženje služe potencijometar P ukupne otpornosti R i stalan otpornik otpornosti R . Naravno, u jednoj dijagonali mosta je izvor jednosmernog napona, a u drugoj galvanometar G kao indikator nule.



Slika 4.3.10. Lociranje smetnje Marejevom metodom

R_m je deo otpornosti potencijometra P u uslovima ravnoteže mosta. Prikazana šema je prilagođena stanju u realnim uslovima. Šematski prikaz u očiglednom obliku mosta je sledeći, pri čemu R_{AB} predstavlja otpornost petlje.



Slika 4.3.11. Ekvivalentna električna šema Marejevog mosta

³⁾ Ovde se naravno ne misli na Marejev Most (Murray Bridge) četvrti po veličini grad u Južnoj Australiji lociran oko 80 km jugoistočno od Adelaide, koji je naziv dobio po australijskoj reci Marej.

4.3. Mostne metode

Imajući u vidu značaj Marejevog mosta i same metode, s obzirom da su ostale mostne metode lociranja mesta zasnovane na otklanjanju nedostataka Marejevog mosta, u daljem izlaganju će biti izvedeni uslovi ravnoteže mosta sa naglaskom na praktičnoj primeni.

U uslovima ravnoteže kroz galvanometar G ne teče struja te je pad napona na njemu jednak nuli (tačke M i N su na istom potencijalu). Primenom metode konturnih struja u ovim uslovima dobija se uslov ravnoteže dat relacijom 4.3.34.

$$\frac{R_m}{R_x} = \frac{2R - R_m}{R_{AB} - R_x} \quad (4.3.34)$$

Otpornost u petlji obe žile do mesta smetnje $2R_x = r_x$ se može napisati u obliku 4.3.35.

$$r_x = R_{AB} \frac{R_m}{R} \quad (4.3.35)$$

U slučaju homogenog voda, gde su l_x dužina voda do smetnje i l ukupna dužina voda, dobija se da je mesto smetnje određeno relacijom 4.3.36.

$$l_x = l \frac{R_m}{R} \quad (4.3.36)$$

Potenciometar P je po pravilu graduisan (izdeljen) na podeoke (najčešće je $M_{\max} = 1000$ podeoka⁴), gde je M očitana vrednost u podeocima. Odavde se izrazi 4.3.35 i 4.3.36 svode na 4.3.37 i 4.3.38.

$$r_x = R_{AB} \frac{M}{M_{\max}} \quad (4.3.37)$$

$$l_x = l \frac{M}{M_{\max}} \quad (4.3.38)$$

Napomena: Primitimo da su otpornosti potenciometra P i otpornika R iste. Međutim, moguće je da otpornost potenciometra bude nešto veća od otpornosti otpornika, ali je uslov da za koliko je otpornost potenciometra veća od neke njihove srednje vrednosti, za toliko treba da bude manja otpornost otpornika. U ovom slučaju je srazmerno povećanju otpornosti potenciometra povećan i broj podeoka na mehaničkom delu potenciometra. Svrha ovakvog pristupa je da se prepoznaju slučajevi obrnutog priključenja žile sa greškom i ispravne žile, kao i slučajevi povećane otpornosti u žili sa greškom od početka do mesta smetnje. U ovakvim slučajevima će se dobiti vrednost M veća od M_{\max} iz čega proizilazi da je rastojanje do mesta smetnje veće od ukupne dužine što, naravno, nije moguće. Tada treba proveriti pravilnost priključivanja i/ili izmeriti razliku otpornosti.

⁴ Kod instrumenta KMK7 broj podeoka je 10000, zbog proporcionalnosti sa unetom ukupnom dužinom od 10000 m.

Razlika otpornosti se može izmeriti koristeći Marejevu metodu. Postupak je isti kao i kod primene Marejeve metode za lociranje smetnje s tim što je suprotni kraj voda osim kratkog spajanja potrebno i uzemljiti (ili upotrebiti neku treću žilu kao pomoćni vod). Smisao primene Marejeve metode za merenje razlike otpornosti je u tome što je u ovom slučaju virtuelni kraj voda u „električnom smislu“ na polovini razlike otpornosti. Napomenimo da se žila sa povećanom otpornošću priključuje na mesto ispravne žile. Formula po kojoj se dobija tražena vrednost razlike otpornosti je 4.3.39.

$$\Delta R = R_s \frac{M_{\max} - M}{M_{\max}} \quad (4.3.39)$$

gde nova oznaka R_s predstavlja ukupnu otpornost petlje uključujući otpornosti žila a i b i povećanje otpornosti koje najčešće predstavlja prelaznu otpornost na spojevima. Važno je napomenuti da ova prelazna otpornost može značajno uticati na tačnost lociranja mesta.

Na šematskom prikazu je smetnja predstavljena kao zemljospoj. To može biti i odvod prema zemlji i/ili nekoj trećoj žili u kابلu ili dodir sa nekom trećom žilom. Uslovi za primenu Marejeve metode podrazumevaju da otpornost izolacije žila upotrebljenih za lociranje odvoda treba da bude takva da je otpornost izolacije ispravne žile (teoretski) bar 1000 puta veća od otpornosti izolacije žile sa greškom. U praksi je pokazano da ovaj odnos može biti i manji ali takav da faktor M u uslovima ravnoteže mosta sa otvorenim suprotnim krajem voda bude ≤ 2 da bi se postigla prihvatljiva tačnost. Imajući u vidu aktuelne vrednosti otpornosti izolacije kablova, proizilazi da se Marejevom metodom mogu uspešno locirati mesta smetnji sa otpornošću izolacije žile sa greškom do tipično $10 \div 20 \text{ M}\Omega$.

Sledeći uslov je da vod treba da bude homogen, to jest da su obe žile iste dužine i poprečnog preseka provodnika.

Što se tiče uticaja stranih napona, najbolje je kad ih nema. Ukoliko ih ima, potrebno ih je eliminisati isključivanjem vodova pod naponom i/ili prespajanjem dovesti do pražnjenja ukoliko su elektrolitičke prirode i/ili su posledica polarizacije dielektrika. U izvesnim slučajevima se strani napon može iskoristiti umesto internog mernog napona ako se postavi prema prikazanoj šemi metode. Ovo važi i za ostale metode lociranja mesta smetnji.

Kod prikaza Marejeve metode zanemaren je uticaj priključnih gajtana što ponekad u praksi može da dovede do neželjene greške merenja. Da bi se eliminisao uticaj priključnih gajtana, poželjno je koristiti formule sa r_x , oduzeti otpornosti priključnih gajtana a zahtevanu dužinu do mesta smetnje izračunati koristeći vrednosti podužne otpornosti r' kao što je pokazano relacijom 4.3.40.

$$r_x = r' l_x \quad (4.3.40)$$

Uticaj nehomogenosti u obliku prelazne otpornosti koja prouzrokuje razliku otpornosti pojedinačnih žila se ogleda u tome da, ukoliko je prelazna otpornost u žili sa greškom između mesta merenja i mesta smetnje, stvarno mesto će biti bliže mestu merenja za dužinu koja odgovara dužini voda čija je otpornost jednaka ovoj prelaznoj otpornosti za aktuelni prečnik provodnika. Ukoliko je prelazna otpornost u ispravnoj žili i/ili u žili sa greškom između kraja voda i mesta smetnje, stvarno mesto će biti srazmerno dalje od merenjem dobijene vrednosti.

4.3. Mostne metode

Ako je prelazna otpornost u ispravnoj žili primena korekcije je jasna, a ako je u žili sa greškom, najbolje je poslužiti se verovatnoćom (veća je verovatnoća da je prelazna otpornost pre smetnje ako je dužina voda do smetnje veća i/ili ima više nastavaka i obrnuto).

Na određivanje mesta smetnje od značaja je i uticaj otpornosti Pupinovih kalemova koje treba uzeti u obzir kod korekcije dobijenih rezultata merenja.

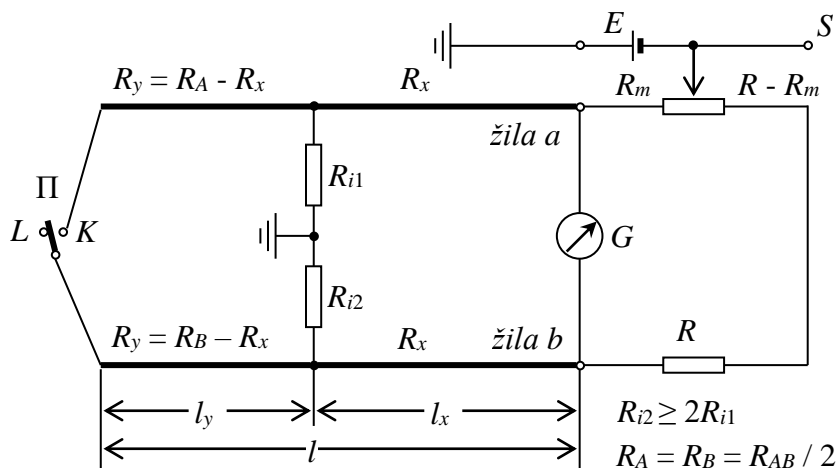
Opisani uticaji na tačnost lociranja mesta smetnji Marejevom metodom važe i kod primene ostalih mostnih metoda lociranja mesta smetnji jednosmernom strujom s tim što su neki značajno redukovani kod, na primer, Grafove metode o kojoj će kasnije biti reči. Osim izloženih korekcija, da bi se povećala tačnost merenja, dobra je ideja da se lociranje smetnje obavi sa oba kraja voda. Ovo važi generalno za sve metode lociranja smetnji.

4.3.6. Kipfmilerov most

Ukoliko nisu zadovoljeni uslovi u pogledu otpornosti izolacije žile sa greškom i ispravne žile za primenu Marejevog mosta, odnosno ne postoji ispravna žila, na raspolaganju je Kipfmilerov most. Primenjuje se kada se vrednosti otpornosti izolacije kreću u opsegu tipično od $0,1 \div 20 \text{ M}\Omega$. Uslovi za njenu primenu su sledeći:

- odnos otpornosti izolacije žile sa nižom vrednošću (uslovno rečeno: žila sa greškom) i žile sa višom vrednošću (uslovno rečeno: ispravna žila) treba da bude 1:2
- otpornost izolacije između žila treba da je 100 puta veća od njihove otpornosti u petlji.

Principska šema mosta za lociranje smetnje Kipfmilerovom metodom je data na slici 4.3.12.



Slika 4.3.12. Kipfmilerova konfiguracija mosta

Za lociranje smetnje Kipfmilerovom metodom, koristi se sličan most kao kod Marejeve metode. Razlika se ogleda u tome što je kod Kipfmilerove metode potrebno obaviti dva merenja (uravnoteženja) mosta i to pri:

4.3. Mostne metode

- otvorenom suprotnom kraju
- zatvorenom (kratko spojenom) suprotnom kraju.

U tu svrhu suprotni kraj može biti opremljen prekidačem Π sa dva položaja: otvoren (L) i zatvoren (K), kao što je predstavljeno na slici 4.3.12. Pri tome će vrednost otpornosti R_m u uslovima ravnoteže biti R_{mL} pri otvorenom suprotnom kraju, odnosno R_{mK} pri zatvorenom suprotnom kraju, a vrednost koeficijenta M opisanog kod izlaganja Marejeve metode će pri otvorenom i zatvorenom suprotnom kraju biti M_L i M_K , respektivno. Formula za izračunavanje otpornosti odnosno dužine do mesta smetnje glasi

$$r_x = R_{AB} \frac{M_K - M_L}{M_{\max} - M_L} \quad (4.3.41)$$

odnosno

$$l_x = l \frac{M_K - M_L}{M_{\max} - M_L} \quad (4.3.42)$$

Imajući u vidu da se Kipfmilerova metoda najčešće primenjuje u uslovima kada su sve parice kabla na deonici merenja zahvaćene vlagom, realno je očekivati uticaj neželjenih struja na rezultat merenja. Da bi se ovaj uticaj minimizirao, odnosno smanjila greška merenja, potrebno je obaviti više (10 do 25) merenja naizmenično pri otvorenom i zatvorenom suprotnom kraju. Ova merenja je potrebno izvesti u pravilnim vremenskim razmacima, tipično 10 sekundi. Parove vrednosti koeficijenata M_L i M_K koji znatnije odstupaju treba eliminisati i od preostalih vrednosti koeficijenata M_L i M_K izračunati njihove srednje vrednosti po obrascima 4.3.43 i 4.3.44.

$$\bar{M}_L = \frac{\sum M_L}{n} \quad (4.3.43)$$

$$\bar{M}_K = \frac{\sum M_K}{n} \quad (4.3.44)$$

gde je n broj obavljenih merenja.

Formula za izračunavanje otpornosti odnosno dužine do mesta smetnje dobija oblik 4.3.45, odnosno formula za izračunavanje mesta smetnje oblik 4.3.46.

$$r_x = R_{AB} \frac{M_K - M_L}{M_{\max} - M_L} \quad (4.3.45)$$

$$l_x = l \frac{M_K - M_L}{M_{\max} - M_L} \quad (4.3.46)$$

U praksi se delotvornijim (tačniji rezultati lociranja) pokazao sledeći pristup: umesto izračunavanja srednjih vrednosti, za svaki par koeficijenata M_L i M_K izračunati koeficijent M po formuli 4.3.47.

$$M = \frac{M_K - M_L}{M_{\max} - M_L} \quad (4.3.47)$$

U ovom slučaju se lakše uočavaju vrednosti M koje više odstupaju. Posle njihovog odstranjivanja izračunava se srednja vrednost koeficijenta M koji se na izračunavanje otpornosti odnosno dužine do mesta smetnje primenjuje kao kod Marejeve metode (izrazi 4.3.48 i 4.3.49).

$$r_x = R_{AB} \frac{M}{M_{\max}} \quad (4.3.48)$$

$$l_x = l \frac{M}{M_{\max}} \quad (4.3.49)$$

Prednost ovog pristupa bez izračunavanja srednjih vrednosti dolazi do izražaja u sledećem slučaju. Naime, pošto se žile kabla nalaze u vlažnoj sredini, to su tokom merenja moguće promene uslova. Kao posledica se u izvesnom procentu slučajeva javlja da vrednosti koeficijenta M asimptotski teže nekoj vrednosti koja predstavlja uslovno rečeno tačnu vrednost.

Direktan zaključak je da je osnovna primena Kipfmilerove metode u slučaju kada su sve žile kabla na deonici merenja u odvodu, odnosno kada nisu ispunjeni uslovi za primenu Marejeve metode. Indirektan zaključak je da je takođe važna primena Kipfmilerove metode u slučaju visokoomskih grešaka jer, ukoliko žila sa greškom ima otpornost izolacije reda veličine desetina megaoma, teško je u kablu u smetnji naći ispravnu žilu sa otpornošću izolacije reda veličine desetina hiljada megaoma da bi bili ispunjeni uslovi za primenu Marejeve metode.

Što se tiče uticaja stranih napona, priključnih gajtana, nehomogenosti provodnika i Pupinovih kalemova na tačnost merenja, važe ista razmatranja kao i kod primene Marejeve metode. Važno je napomenuti da se u slučaju Kipfmilerove metode veštačkim formiranjem stranog (eksternog) jednosmernog napona može izmeriti smetnja i kada nije ispunjen uslov da jedna žila (uslovno ispravna) ima dvostruko veću otpornost izolacije od druge.

Ukoliko se greškom u kablu smatra otpornost izolacije veća od $50 \text{ M}\Omega$ do reda veličine stotina megaoma, direktna primena Marejeve i/ili Kipfmilerove metode praktično nije moguća. U slučaju da je potrebno locirati mesto odvoda ovog tipa, postupak je sledeći:

Na proizvoljno odabranom broju parica se visokonaponskim ispitnim generatorom nađu dve žile čiji se probojni (jednosmerni) naponi prema zemlji (ili nekoj trećoj žili) razlikuju bar za 200 V . Zatim se žila sa nižim probojnim naponom priključi kao žila sa greškom a žila sa višim probojnim naponom kao ispravna. Visokonaponski ispitni generator se jednim krajem priključi na priključnicu koja je u šematskom prikazu Marejeve i Kipfmilerove metode označena slovom S , drugim krajem na zemlju (ili neku treću žilu), a interni merni napon instrumenta isključi. U kolo visokonaponskog generatora je potrebno staviti zaštitnu otpornost od tipično $100 \text{ k}\Omega$. Zatim se ispitni napon visokonaponskog generatora polako povećava dok ne dođe do proboja u žili sa nižim probojnim naponom. U ovakvim okolnostima su stvoreni uslovi za primenu Marejeve metode. Kako visokonaponski ispitni generatori obično rade u switch-off modu, to će se ispitni napon kod proboja isključiti a time će nestati razlozi za

4.3. Mostne metode

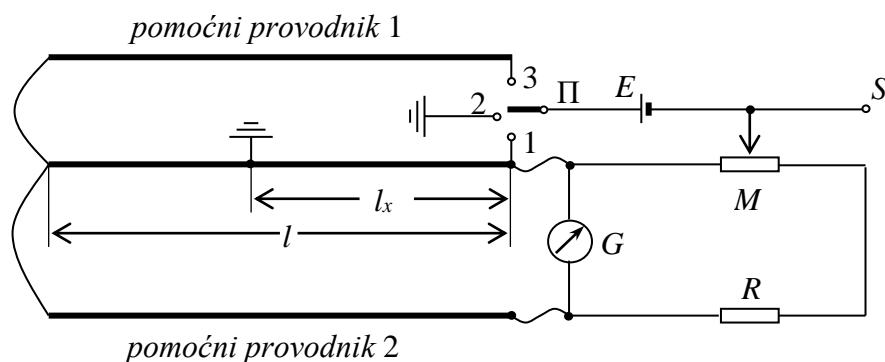
njegovo isključenje te će se on ponovo uključiti itd. Ovo prouzrokuje treperenje kazaljke galvanometra u mostu što otežava njegovo uravnoteženje, te je tačnost ovog postupka veoma ograničena.

Napomena: Ne preporučuje se povećanje napona visokonaponskog ispitnog generatora iznad 1000 V, zbog mogućnosti proboja izolacije i oštećenja kabla.

4.3.7. Grafova metoda

Grafova metoda merenja u tri tačke se primenjuje kada nije moguće obezbediti ispravnu žilu istog poprečnog preseka provodnika i iste dužine kao žila sa greškom. Ovo posebno dolazi do izražaja kada se kao ispravna žila povlači poseban pomoćni vod. Osim toga, ova metoda se primenjuje kada se zahteva povećana tačnost. Važno je napomenuti da je Grafova metoda merenja u tri tačke najtačnija mostna metoda lociranja mesta smetnje. Njenom primenom se eliminiše uticaj priključnih gajtana i odstupanja u pogledu otpornosti žile sa greškom i ispravne žile.

Šematski prikaz metode je dat na slici 4.3.12⁵⁾.



Slika 4.3.13. Grafova metoda merenja u tri tačke

Primena Grafove metode merenja u tri tačke se prema prikazanoj slici sastoji iz izvođenja tri merenja i to: uravnoteženja mosta sa preklopnikom Π u položaju 1, 2 i 3, pri čemu se dobijaju merne vrednosti M_1 , M_2 i M_3 , respektivno. Ako je žila sa greškom uniformnog poprečnog preseka i homogena, mesto smetnje se nalazi na rastojanju l_x od mesta merenja

$$l_x = l \frac{M_{K2} - M_{K1}}{M_{K3} - M_{K1}} \quad (4.3.50)$$

Primitimo da za svaki položaj preklopnika most ima isti izgled kao u slučaju primene Marejeve metode tako što se za slučaj preklopnika u položaju 1 simulira smetnja na početku

⁵⁾ Ovu šemu ne treba pobrkati sa tzv. Grafovom mostom na kuhinjskim slavinama (Graff bridge faucet). Grafov most je, u tom smislu, luksuzna ornamentirana hromirana slavina koja obezbeđuje mešanje tople i hladne vode kroz jednu mlaznicu, a proizvodi je privatna američka kompanija Graff.

žile sa greškom, položaj 2 odgovara standardnom slučaju lociranja mesta smetnje Marejevom metodom, a kada je preklopnik u položaju 3 simulira se smetnja na kraju žile sa greškom. Stoga važi uslov kao kod primene Marejeve metode da otpornost izolacije pomoćnih provodnika 1 i 2 bude bar 1000 puta veća od otpornosti izolacije žile sa greškom koja može biti do tipično $10 \div 20 \text{ M}\Omega$ i da je provodnik žile sa greškom homogen. Pomoćni provodnici 1 i 2 mogu biti proizvoljne dužine i prečnika a njihova homogenost nije od značaja. Međutim, moguće je da se most ne može uravnotežiti pri merenju kada je preklopnik u položaju 3 ako žila sa greškom ima veću otpornost od otpornosti pomoćnog provodnika 2 kao i u slučaju kada je greška bliže suprotnom kraju u navedenim uslovima odnosa otpornosti, kao što je opisano i kod primene Marejeve metode. U tom slučaju je, da bi most mogao da se uravnoteži, potrebno zameniti mesta žile sa greškom i pomoćnog provodnika 2. Tada će se u uslovima ravnoteže mosta umesto M_2 i M_3 dobiti neki novi koeficijenti, M_{22} i M_{33} , respektivno, čiji je odnos sa koeficijentima M_2 i M_3 dat izrazom 4.3.51.

$$\begin{aligned} M_2 &= 2000 - M_{22} \\ M_3 &= 2000 - M_{33} \end{aligned} \quad (4.3.51)$$

Njihovim uvrštavanjem u prethodnu formulu za rastojanje do mesta smetnje dobija se 4.3.52.

$$l_x = l \frac{2000 - M_{22} - M_1}{2000 - M_{33} - M_1} \quad (4.3.52)$$

Ako se želi interpretacija izmerenog mesta smetnje putem otpornosti, formula je 4.3.53.

$$r_x = R_A \frac{M_{K2} - M_{K1}}{M_{K3} - M_{K1}} \quad (4.3.53)$$

gde je r_x otpornost provodnika neispravne žile od početka (mesta merenja) do mesta smetnje, a R_A ukupna otpornost neispravne žile. Primećujemo da se, za razliku od opisa Marejeve i Kipfmilerove metode, ovde umesto otpornosti parice koristi otpornost pojedinačne žile. Koristeći Grafovnu metodu može se izmeriti otpornost jedne žile. U ovom slučaju se izostavlja merenje u položaju 2 preklopnika. Rezultat merenja je dat izrazom 4.3.54.

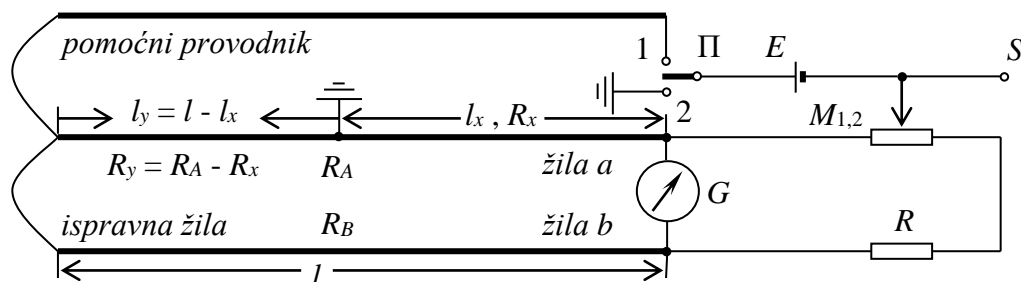
$$R_A = \frac{\frac{R_S}{2} (M_3 - M_1)}{1000} \quad (4.3.54)$$

R_S je ukupna otpornost petlje računajući i otpornost priključnih gajtana.

Napomena: Opisana je primena Grafove metode korišćenjem Marejevog mosta. Grafova metoda se takođe može primeniti i na Kipfmilerov i Varlijev most.

4.3.8. Fišerova metoda

Fišerova metoda, koju neki autori nazivaju Hajncelmanova (Heinzelmann), a neki Fišer-Hajncelmanova, predstavlja modifikovanu Grafov metodu merenja u tri tačke. Razlika je u tome što je izostavljeno merenje u položaju 1 preklopnika Π kod Grafove metode. Principska šema je data na slici 4.3.14⁶⁾.



Slika 4.3.14. Fišerova mostna metoda

Izvede se dva merenja i to sa preklopnikom u položaju 1 na slici, pri čemu se dobija merni rezultat M_1 i sa preklopnikom u položaju 2 pri čemu se dobija merni rezultat M_2 . Otpornost u žili sa greškom R_x od početka (mesta merenja) do smetnje je dat sa 4.3.55.

$$R_x = R_A \frac{M_2}{M_1} \quad (4.3.55)$$

gde je R_A ukupna otpornost žile a . Ako je $R_A = R_B$, onda se može napisati

$$r_x = R_{AB} \frac{M_2}{M_1} \quad (4.3.56)$$

gde je r_x otpornost parice do mesta smetnje, a R_{AB} otpornost petlje. Rastojanje do mesta smetnje je dato sa 4.3.57, odnosno 4.3.58.

$$l_x = \frac{M_2}{M_1} \quad (4.3.57)$$

$$l_x = l - l_y \quad (4.3.58)$$

Posle sređivanja dobijaju se izrazi 4.3.59 i 4.3.60.

⁶⁾ Fišerov most (Fisher bridge) je i naziv za posebnu vrstu železničkih mostova konstruisanih u vidu zatvorenih drvenih kućica ili tunela građenih sredinom XX veka. Ovi mostovi obično su se gradili preko potoka koji bi pretili da nabujaju u proleće, a široj populaciji su poznatiji iz filma Mostovi okruga Madison sa Meril Strip i Klint Istvudom u glavnim ulogama.

$$l_y = l \frac{M_1 - M_2}{M_1} \quad (4.3.59)$$

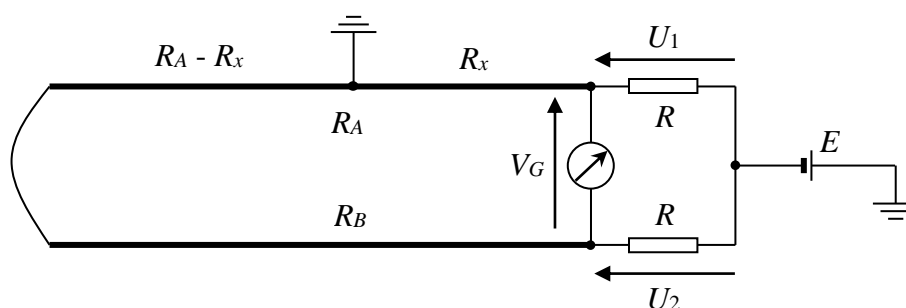
$$r_y = R_{AB} \frac{M_1 - M_2}{M_1} \quad (4.3.60)$$

Uslovi za primenu Fišerove metode su isti kao i uslovi za primenu Grafove metode merenja u tri tačke. Interesantno je napomenuti da se ovde merenjem koeficijenta M_1 simulira kraj žile sa greškom čime se povećava tačnost u poređenju sa Marejevom metodom. Ovo naročito dolazi do izražaja u slučajevima kada je smetnja bliže suprotnom kraju kabla.

4.3.9. Primena neuravnoteženog Vitstonovog mosta na predlociranje smetnje

Uravnotežavanje mostova može oduzimati puno vremena, naročito ako se radi mehanički, pomoću servo motora kao kod KMK7. Da bi se uštedelo na vremenu i smanjili troškovi održavanja, jedna od tendencija proizvođača savremene merne opreme je konstrukcija mostova kod kojih se za dobijanje rezultata merenja ne mora čekati na uravnoteženje.

Da bi se odredio uticaj napona napajanja mosta na merenje kod neuravnoteženog mosta, može se pored napona dijagonale V_G , meriti i napon na jednom od stalnih otpornika u mostu. Na slici 4.3.15 prikazana je konfiguracija neuravnoteženog Vitstonovog mosta koji se koristi za predlociranje mesta niskoomske smetnje. Pored napona V_G , najčešće se merie još i napon U_1 ili napon U_2 .



Slika 4.3.15. Neuravnoteženi Vitstonov most za predlociranje omske smetnje

Struje kroz stalne otpornike su

$$I_1 = \frac{U_1}{R} \quad (4.3.61)$$

$$I_2 = \frac{U_2}{R} \quad (4.3.62)$$

Dve jednačine po naponskim Kirhofovima zakonima za kolo sa slike 4.3.15 su

$$-U_1 + U_2 + V_G = 0 \text{ V} \quad (4.3.63)$$

$$(R_{AB} - R_x)I_2 - V_G - R_x I_1 = 0 \text{ V} \quad (4.3.64)$$

Odakle se dobija da je tražena otpornost R_x

$$R_x = R_{AB} \frac{U_1 - V_G}{2U_1 - V_G} - R \frac{V_G}{2U_1 - V_G} \quad (4.3.65)$$

U praktičnoj izvedbi se neuravnoteženi mostovi realizuju sa strujnim izvorom I_N , pri čemu će važiti

$$2U_1 - V_G = U_1 + U_2 = RI_1 + RI_2 = R(I_1 + I_2) = RI_N \quad (4.3.66)$$

Tada se 4.3.65 svodi na 4.3.67.

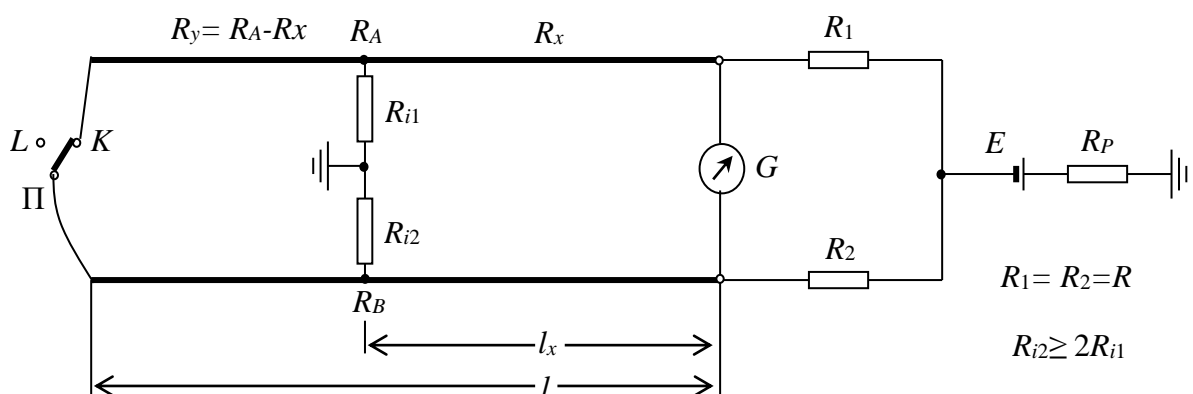
$$R_x = \frac{R_{AB}}{R} \cdot \frac{U_1 - V_G}{I_N} + \frac{V_G}{I_N} \quad (4.3.67)$$

Pa je udaljenost do mesta smetnje

$$l_x = l \cdot 2 \left(\frac{U_1 - V_G}{RI_N} + \frac{V_G}{R_{AB} I_N} \right) \quad (4.3.68)$$

4.3.10. Hektorova metoda

Kao drugi primer primene neuravnoteženih mostova na predlociranje smetnji, u daljem tekstu će biti objašnjena Hektorova metoda i njena izvedba⁷⁾. Hektorova metoda je osnova za tzv. modifikovanu Hektorovu metodu koja se koristi u nekim savremenim instrumentima (EFL 10 proizvođača Elektronika, odnosno KMK 70 proizvođača Seba KMT).



Slika 4.3.16. Hektorova mostna metoda

⁷⁾ Hektorov most (Hector Bridge) je početna tačka poznate takmičarske rafting rute na reci Vajtvoter (Whitewater) u Arkanzasu, SAD. Za razliku od mosta datog na slici 4.16, konstruktori Hektorovog mosta u Arkanzasu tvrde da je njihov most uvek u ravnoteži.

4.3. Mostne metode

Hektorova metoda je šematski predstavljena na slici 4.3.16. Ona predstavlja varijantu Kipfmilerove metode bez uravnotežavanja. Stoga su i uslovi za primenu Hektorove metode su isti kao i kod Kipfmilerove metode.

Kod Hektorove metode se izvode dva merenja:

- jedno u uslovima kada je suprotni kraj otvoren (preklopnik Π u položaju L) i
- drugo kada je suprotni kraj zatvoren (preklopnik Π u položaju K).

Pri tome se evidentira skretanje kazaljke galvanometra G i to α_K u slučaju kada je suprotni kraj zatvoren i α_L kada je suprotni kraj otvoren. Skretanje kazaljke galvanometra je srazmerno padu napona između tačaka dijagonale u koju je priključen galvanometar i zavisi od unutrašnje otpornosti galvanometra u slučaju kada je suprotan kraj zatvoren i od otpornosti žile sa greškom od mesta merenja do mesta smetnje. Da bi se eliminisao uticaj unutrašnje otpornosti galvanometra, potrebno je ista merenja izvršiti i sa drugog kraja kabla pri čemu se dobijaju skretanja galvanometra α_L' i α_K' za slučaj otvorenog i zatvorenog suprotnog kraja, respektivno. U uslovima homogenosti provodnika žile A i B i kada je $R_A = R_B$, rastojanje od mesta merenja do mesta smetnje je dato izrazom 4.3.69.

$$l_x = l \frac{\alpha_L \cdot \alpha_K'}{\alpha_L \alpha_K' + \alpha_K \alpha_L'} \quad (4.3.69)$$

Zahtev koji treba da bude ispunjen je da ukupna struja u uslovima otvorenog i zatvorenog suprotnog kraja bude ista. To se postiže priključivanjem predotpornika R_P kao što je dato na šematskom prikazu, dovoljno velike vrednosti.

Modifikovana Hektorova metoda u slučaju pomenutih mostova (EFL 10 / KMK 70) podrazumeva merenje ukupne struje i struja u pojedinim žilama u uslovima otvorenog i zatvorenog suprotnog kraja i rešavanje Kipfmilerove jednačine sa pet nepoznatih, merenjem sa jednog kraja kabla.

4.3.11. Predlociranje prekida de Sotijevim mostom

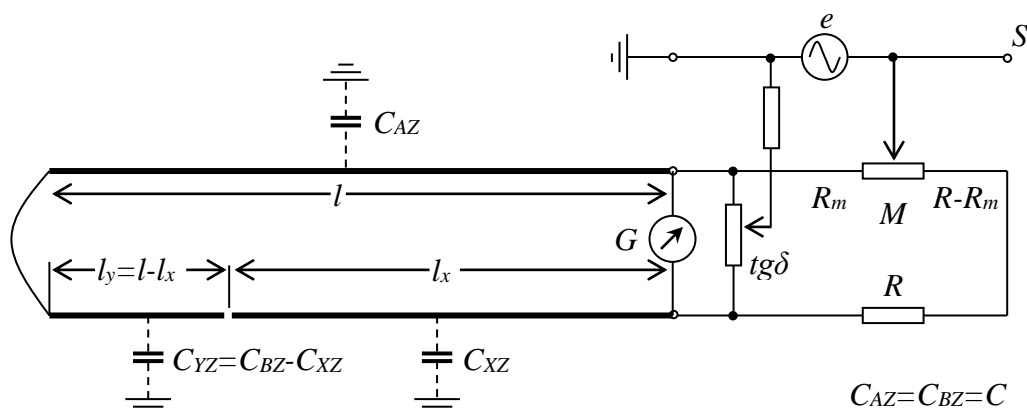
Za lociranje prekida se koristi de Sotijev most, šematski predstavljen na slici 4.3.17.

Za razliku od prethodno opisanih mostova, napajanje de Sotijevog mosta je naizmničnom umesto jednosmernom strujom. Pod pretpostavkom da su naznačene kapacitivnosti čiste (bez gubitaka, $\text{tg}\delta \rightarrow 0$) i da su žile homogene u pogledu kapacitivnosti (imaju istu i uniformnu podužnu kapacitivnost), jednačina ravnoteže za ovaj most prema oznakama na slici 4.3.17 je data izrazom 4.3.70.

$$C_{xz} = C \frac{R_m}{R} \quad (4.3.70)$$

S obzirom na srazmernost kapacitivnosti žile prema zemlji sa njenom dužinom, ovo se svodi na 4.3.71, odnosno na računanje rastojanja do mesta smetnji.

$$l_x = l \frac{R_M}{R} \quad (4.3.71)$$



Slika 4.3.17. De Sotijev most za lociranje smetnji

Iz odnosa ukupnog (npr. 1000) i očitano broj podelaka M potencijometra za uravnoteženje mosta i njegove ukupne otpornosti R i otpornosti u uslovima ravnoteže R_m , zamenom u jednačinama 4.3.70 i 4.3.71 dobijaju se 4.3.72 i 4.3.73.

$$C_{xz} = C \frac{M}{1000} \quad (4.3.72)$$

$$l_x = l \frac{M}{1000} \quad (4.3.73)$$

Uslovi za primenu ovog mosta su:

- da postoji jedna ispravna žila,
- da žila sa greškom nije u dodiru sa nekom drugom žilom, zemljom i nije u odvodu,
- da je dužina kabla manja od 5 km,
- da kabl nije pupinovan.

U realnim uslovima je $\text{tg} \delta \neq 0$ (žile kabla uvek imaju neku odvodnost) te je impedansa u granama mosta koje sačinjavaju žile kabla kompleksne prirode, tako da osim izjednačavanja imaginarnog dela (kapacitivnosti) treba izvršiti i izjednačavanje realnog dela (odvodnosti). Ovo se postiže promenom otpornosti potencijometra označenog sa $\text{tg} \delta$, i to naizmenično, prvo $\text{tg} \delta$ a zatim M , itd. Na ovaj način se postiže izraženija ravnoteža mosta (minimum pokazivanja galvanomera).

Ukoliko je dužina kabla veća od 5 km i/ili je kabl pupinovan, lociranje prekida se izvodi korišćenjem napajanja mosta impulsima jednosmerne struje ili naizmeničnom strujom vrlo niske frekvencije (reda veličine nekoliko Hz) uz neizmenjenu konfiguraciju mosta.

Na slici je otpornost potencijometra označenog sa $\text{tg} \delta$ predstavljena kao paralelna otpornost čistim kapacitivnostima $C_{AZ} + C_{YZ}$ i C_{XZ} . Ukoliko se na opisani način ne može postići

4.3. Mostne metode

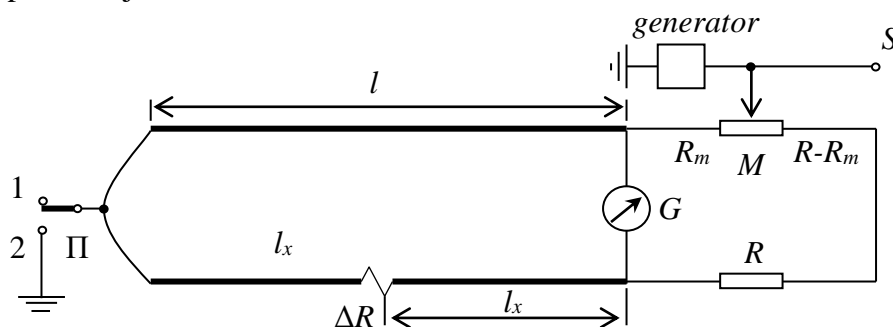
zadovoljavajuće uravnoteženje mosta u slučaju veće odvodnosti, potrebno je dodati rednu podesivu otpornost (potenciometar) u žilu sa greškom i izvršiti uravnoteženje.

Ovaj most se može iskoristiti i za merenje kapacitivne simetrije žila parice kabla prema zemlji (omotaču) i/ili nekoj drugoj žili ili grupi žila. Razlika je samo u tome što suprotan kraj parice treba da bude otvoren. Merna vrednost otpornosti R_m treba da teži vrednosti R (odnosno da M teži 1000) i u najpovoljnijem slučaju da joj bude jednaka ($M = 1000$). Ukoliko to nije slučaj, moguće je:

- postojanje nepoželjnih kapacitivnih sprega,
- rasporenje
- da je jedna od žila u prekidu
- da jedna od žila ima dodir i/ili zemljospoj.

4.3.12. Lociranje omskog diskontinuiteta

Merna šema mosta za lociranje omskog diskontinuiteta (smetnje povećane prelazne otpornosti) je predstavljena na slici 4.3.18.



Slika 4.3.18. Konfiguracija mosta za lociranje omskog diskontinuiteta

Izvode se dva merenja i to:

- prvo merenje sa preklopnikom Π u položaju 1 pri čemu se ravnoteža mosta ostvaruje za neko R_{m1} . Očitani koeficijent je M_1 . Ovo merenje se izvodi naizmničnom strujom ili impulsima jednosmerne struje, prema uslovima opisanim u okviru opisa lociranja mesta prekida.
- drugo merenje se izvodi jednosmernom strujom sa preklopnikom u položaju 2 pri čemu se ravnoteža mosta ostvaruje za neko R_{m2} . Očitani koeficijent je M_2 .

Rastojanje od početka mesta merenja do mesta smetnje je dato formulom 4.3.74.

$$l_x = l \frac{M_1 - M_2}{1000 - M_2} \quad (4.3.74)$$

4.3. Mostne metode

Napomenimo da je, u cilju postizanja bolje tačnosti, potrebno izvesti više merenja naizmjenično prebacujući preklopnik iz položaja 1 u položaj 2 i obrnuto, i u navedenu formulu uvrstiti njihove srednje vrednosti kao kod opisa Kipmilerove metode.

U okviru dosadašnjeg izlaganja prikazan je postupak lociranja mesta smetnji sa jedne strane. Dobro je, u cilju povećanja tačnosti, isti postupak ponoviti i sa suprotne strane kabla.

Neka je l_x rastojanje do mesta smetnje od početka kabla a l_y rastojanje do mesta smetnje mereno sa suprotne strane kabla. Ukupna dužina l bi trebalo da bude $l = l_x + l_y$. Međutim, u praksi je obično $l \neq l_x + l_y$. U tom slučaju je potrebno korigovati rezultat koristeći proporciju 4.3.75.

$$l_x : l_{xT} = (l_x + l_y) : l \quad (4.3.75)$$

gde je l_{xT} uslovno rečeno tačna vrednost. Odavde se dobija 4.3.76.

$$l_{xT} = l \frac{l_x}{l_x + l_y} \quad (4.3.76)$$

I, analogno 4.3.77.

$$l_{yT} = l \frac{l_y}{l_x + l_y} \quad (4.3.77)$$

Sada je zadovoljen uslov da je zbir rastojanja izmerenih sa suprotnih krajeva, jednak ukupnoj dužini žile.

$$l_{xT} + l_{yT} = l \quad (4.3.78)$$

4.3.13. Izvori grešaka

Grube greške kod mostnih metoda najčešće nastaju kao greška operatera, recimo nepoznavanjem opcija uređaja koji se koristi, primenom pogrešne konfiguracije mosta neprimerene za date uslove, pogrešnim unosom podataka, nepoštovanjem procedure i uslova rada (merenje na nezagrejanom uređaju) i sl. Tako npr. pogrešan unos podužne kapacitivnosti konkretne bakarne parice uzrokuje netačna očitavanja rastojanja na osnovu merene ukupne kapacitivnosti testirane žile.

Jedan od čestih problema kod mostnih metoda je temperaturna stabilnost, koja je naročito izražena kod terenskih instrumenata. Ravnoteža tek uključenog (hladnog) mosta može se značajno narušiti tokom vremena dok struja prolazi kroz pojedine elemente instrumenta i zagreva ih. Tako npr. kroz merni potencijometar protiče struja koja ga vremenom zagreva i povećava, kako njegovu ukupnu otpornost, tako i odnos otpornosti R_m i $R - R_m$. Takođe, varijacije u spoljašnjoj temperaturi mogu dovesti do greške merenja i rasipanja rezultata.

Napajanje mosta koji nije uravnotežen mora biti stabilno, jer utiče na očitavanje rezultata i na mehanizam koji most automatski dovodi u ravnotežu. Ispražnjene baterije u instrumentu

4.3. Mostne metode

moгу dovesti do slabljenja struje kroz most, čime je nekada onemogućeno uravnoteženje, a češće uzrokuje porgešna očitavanja.

Instrument u mernoj dijagonali mosta takođe nije idealan: njegova konačna unutrašnja otpornost, fizička ograničenja indikatora, rezolucija i stabilnost su neki od faktora koji utiču na grešku merenja.

Za sve ove uticaje se može definisati osetljivost mosta O na promene tih veličina.

Greške mogu nastati uticajem spoljašnjih faktora, npr. u kabl može ući voda koja tada na tom delu kabla stvara nehomogeni deo koji utiče na promenu podužne otpornosti i/ili kapacitivnosti kabla, što dovodi do pogrešnih rezultata pri merenju jer je homogenost sredine (kabla) uslov za preračunavanje udaljenosti mesta smetnje.

Kod većine mostnih metoda, greška može nastati:

- ukoliko otpornost izolacije ispravne žile nije dovoljno veća od otpornosti izolacije žile sa greškom,
- ako obe žile nisu iste dužine i/ili poprečnog preseka provodnika (vod nije homogen),
- strani spoljašnji naponi koji se mogu javiti,
- prelazna otpornost priključnih gajtana (unos nehomogenost).
- usled prisustva Pupinovih kalemova

Dodatni uzroci grešaka merenja Kipfmilerovom metodom su:

- nedovoljna otpornost izolacije žile,
- pojava neželjenih struja (usled vlage u kablovima),
- neadekvatan broj merenja i nejednaki intervali između pojedinačnih merenja,
- nehomogenost, Pupinovi kalemovi i strani izvori, kao kod Marejeve metode.

Greške kod Grafove, Fišerove i Varlijeve metode nastaju usled:

- male otpornosti izolacije žila,
- nehomogenosti voda,
- veće otpornosti žile sa greškom od otpornosti pomoćnog provodnika (položaj 3 preklopnika),
- slučaja kada je greška voda bliža suprotnom kraju.

Za Hektorovu metodu:

- važe isti uslovi kao kod Kipfmilerove osim dodatne mogućnosti greške ako ukupna struja u uslovima otvorenog i zatvorenog suprotnog kraja nije ista.

Kod De Sotijevog mosta greške nastaju ako:

- kapacitivnosti imaju gubitaka,
- žile nisu homogene (podužna kapacitivnost nije ista),
- nijedna žila nije ispravna,
- žila sa greškom dodiruje drugu žilu, zemlju ili je u odvodu,
- dužina kabla premašuje 5 km ili je kabl pupinovan,

Kod mosta za lociranje omskog diskontinuiteta greške nastaju:

- ako se merenja ne obavljaju naizmenično u položajima 1 i 2 preklopnika,
- ako se merenje obavlja samo sa jedne strane kabla

4.3.14. Proračun greške merenja Marejevim mostom

Primer proračuna greške biće pokazan na primeru Marejevog mosta, s obzirom da je on najčešće primenjivan merni most u pristupnoj mreži i da se mnoge metode merenja svode na primenu Marejevog mosta. Pod pretpostavkom da nisu učinjene grube greške prilikom merenja Marejevim mostom, ukupna greška merenja sastojće se od sistematske greške merenja i slučajne greške merenja.

$$|G_{I_x}| = |G_{sist}| + |G_{sluc}| \quad (4.3.79)$$

U sistematsku grešku merenja ulaze greška poznavanja dužine kabla G_l , greška nehomogenosti G_{nehom} i greška uzrokovana otpornošću priključnih kablova $G_{priklj.kabl.}$. Ako je neka od ovih grešaka poznata, može se uzeti u obzir i isključiti iz rezultata merenja, čime se dobija tačniji rezultat.

U slučajnu grešku kod Marejeve metode uključene su greška nesigurnosti očitavanja najmanje značajne cifre $G_{\pm 1}$ i inherentna greška mosta G_R , koja pokazuje uticaj tačnosti merenja otpornosti u datoj izvedbi. Izraz za grešku sada se može napisati kao

$$|G_{I_x}| = \underbrace{|G_{I_x}^{(l)}| + |G_{I_x}^{(ne\ hom)}| + |G_{I_x}^{(priklj.\ kabl.)}|}_{G_{sist}} + \underbrace{|G_{I_x}^{(\pm 1)}| + |G_{I_x}^{(R)}|}_{G_{sluc}} \quad (4.3.80)$$

4.3. Mostne metode

Iz izraza za proračun udaljenosti do smetnje, sledi da je greška merenja koju unosi nepoznavanje stvarne dužine linije data kao

$$G_{l_x}^{(l)} = \frac{\partial l_x}{\partial l} G_l = \frac{M}{M_{\max}} G_l = \frac{l_x}{l} G_l \quad (4.3.81)$$

Gde je G_l – greška sa kojom se poznaje dužina kabla.

Greška nehomogenosti zavisi od konkretne konfiguracije kabla, tj. od broja različitih deonica. Ne postoji opšti izraz za grešku nehomogenosti, ali se njena vrednost može proceniti na osnovu šeme kabla i tabličnih vrednosti otpornosti za svaki tip kabla na trasi. Za razliku od reflektometrije u vremenskom domenu, kod mernih mostova greška nehomogenosti je prisutna, čak i ako se smetnja nalazi na prvom deonici od instrumenta, jer se most uravnotežava u odnosu na ukupnu otpornost petlje.

Specijalan oblik greške nehomogenosti je greška koju unose priključni kablovi instrumenta. S obzirom da se on može lako odrediti ili je u većini slučajeva poznat, ovde je ovaj oblik greške izdvojen kao poseban član. Priključni kablovi predstavljaju dodatan predotpor u šemi mosta, pa se, u zavisnosti od otpornosti petlje, može desiti da se smetnja "pomeri" bliže ili dalje od instrumenta. Ako je otpornost petlje veoma mala priključni kablovi će uticati i na merenje otpornosti petlje, koje se kasnije koristi u izračunavanju rastojanja do smetnje. Neka je otpornost svakog od priključnih kablova R_{KA} i neka je R_{AB} otpornost petlje u koju je uračunata i otpornost priključnih kablova. Tada je greška koju priključni kablovi unose u merenje:

$$G_{l_x}^{(prikj.kabl)} = (l - l_x) \frac{2R_{KA}}{R_{AB}} \quad (4.3.82)$$

Vidi se da priključni kablovi unose veću grešku, ako je smetnja bliže instrumentu jer je tada razlika $l - l_x$ velika.

Iz izraza za proračun udaljenosti do smetnje dobija se da je

$$G_{l_x}^{(\pm 1)} = l \frac{\pm 1}{M_{\max}} \quad (4.3.83)$$

$G_{l_x}^{(R)}$ je komponenta greške koji zavisi od osetljivosti mosta na promene otpornosti u okolini nule i iznosi

$$\begin{aligned} G_{l_x}^{(R)} &= \frac{\partial \left[l \frac{2R_x}{R_{ab}} \right]}{\partial R_x} G_{R_x} + \frac{\partial \left[l \frac{2R_x}{R_{ab}} \right]}{\partial R_{ab}} G_{R_{ab}} = l \frac{2}{R_{ab}} G_{R_x} + l \frac{2R_x}{R_{ab}^2} G_{R_{ab}} = \\ &= l \frac{2R_x}{R_{ab}} \frac{G_{R_x}}{R_x} + l \frac{2R_x}{R_{ab}} \frac{G_{R_{ab}}}{R_{ab}} = 2l_x \left(\frac{\Delta R}{R} \right)_{mosta} \end{aligned} \quad (4.3.84)$$

4.3. Mostne metode

gde je R otpornost uravnotežavajućeg potencijometra u Marejevom mostu, a ΔR najmanja promena otpornosti koju most može da oseti.

Radi boljeg razumevanja računa greške kod Marejeve metode, u nastavku će biti data dva brojna primera.

Primer 1

Neka je obavljeno predlociranje smetnje Marejevom metodom pomoću instrumenta KMK 6. KMK 6 ima $M_{max} = 1000$ podeoka na potencijometru ukupne otpornosti tipično $R = 100 \Omega$, osetljivost mu je $0,1 \Omega / 100 \Omega$ i otpornost priključnih kablova 1Ω . Pored toga, pretpostavimo da je dužina kabla poznata sa određenom greškom i to kao $l = 1 \text{ km} \pm 20 \text{ m}$ i da je pri merenju otpornosti petlje dobijena vrednost od $R_{AB} = 200 \Omega$.

Neka je tačna udaljenost smetnje od instrumenta $l_x = 100 \text{ m}$ (smetnja je blizu instrumentu). Na osnovu gornjih izraza dobija se da je

$$G_{sluc} = \pm |G_{l_x}^{(\pm 1)}| \pm |G_{l_x}^{(R)}| = \pm \frac{l}{M_{max}} \pm 2l_x \frac{\Delta R}{R} = \pm \frac{1 \text{ km}}{1000} \pm 2 \cdot 100 \text{ m} \frac{0,1 \Omega}{100 \Omega} = \pm 1 \text{ m} \pm 0,2 \text{ m} = \pm 1,2 \text{ m} \quad (4.3.85)$$

Granice sistematskih grešaka iznose pojedinačno

$$G_{l_x}^{(l)} = l_x \frac{G_l}{l} = 100 \text{ m} \frac{\pm 20 \text{ m}}{1 \text{ km}} = \pm 2 \text{ m} \quad (4.3.86)$$

$$G_{l_x}^{(prijl.kabl)} = (l - l_x) \frac{2R_{KA}}{R_{AB}} = (1 \text{ km} - 100 \text{ m}) \frac{2 \cdot 1 \Omega}{200 \Omega} = +9 \text{ m} \quad (4.3.87)$$

Međutim, greška priključnih kablova se može oduzeti od rezultata merenja, pa ona ne doprinosi konačnoj grešci sa kojom će biti određeno rastojanje do smetnje. Kako greška nehomogenosti nije poznata, sledi da će ukupna greška merenja biti

$$|G_{l_x}| \geq 2 \text{ m} + 1,2 \text{ m} = 3,2 \text{ m} \quad (4.3.89)$$

Na osnovu ovako određene vrednosti greške, može se zaključiti da bi rezultat merenja, nakon oduzimanja greške priključnih kablova, bio negde u intervalu:

$$l_x = 100 \text{ m} - 9 \text{ m} \pm 3,2 \text{ m} \in [87,8 \text{ m}; 94,2 \text{ m}] \quad (4.3.90)$$

Dakle, greška ukazuje na raspon mesta smetnje od oko 6,5 m.

Primer 2

Neka su svi parametri i rezultati merenja isti kao i u prethodnom primeru, ali neka je sada udaljenost smetnje od instrumenta $l_x = 900$ m (smetnja je daleko od instrumenta u odnosu na ukupnu dužinu kabla).

Promeniće se granice sledećih grešaka

$$|G_{l_x}^{(R)}| = \pm 2l_x \frac{\Delta R}{R} = \pm 2 \cdot 900 \text{ m} \frac{0,1 \Omega}{100 \Omega} = \pm 1,8 \text{ m} \quad (4.3.91)$$

$$|G_{l_x}^{(l)}| = l_x \frac{G_l}{l} = 900 \text{ m} \cdot \frac{\pm 20 \text{ m}}{1 \text{ km}} = \pm 18 \text{ m} \quad (4.3.92)$$

$$|G_{l_x}^{(prilj.kabl)}| = (l - l_x) \frac{2R_{KA}}{R_{AB}} = (1 \text{ km} - 900 \text{ m}) \frac{2 \cdot 1 \Omega}{200 \Omega} = 1 \text{ m} \quad (4.3.93)$$

Ponovo greška priključnih kablova ne ulazi u ukupnu grešku merenja, jer se može oduzeti od vrednosti koju pokaže instrument. Ukupna greška sada je

$$|G_{l_x}| \geq +1 \text{ m} + 1,8 \text{ m} + 18 \text{ m} = 20,8 \text{ m} \quad (4.3.94)$$

Na osnovu određene vrednosti greške, može se očekivati da se dobije sledeći rezultat:

$$l_x \in [900 \text{ m} - 1 \text{ m} - 20,8 \text{ m}; 900 \text{ m} - 1 \text{ m} + 20,8 \text{ m}] = [878,2 \text{ m}; 919,8 \text{ m}] \quad (4.3.95)$$

Greška će biti u rasponu od 40 m, odnosno oko 6 puta veća nego u prethodnom slučaju.

Reference

- [1] „Cable Test Set KMK 7 Operating Manual“, Hagenuk KMT GmbH, Radeburg/Dresden, 1997.
- [2] Vojislav Bego, „Mjerenja u elektrotehnici“, Tehnička Knjiga, Zagreb, 1984.
- [3] A.D.V.N. Kularatna, „Digital and Analogue Instrumentation: Testing and Measurement“, IET, 2002.
- [4] M. Wilding, „Developments in cable diagnostics“, IEEE, 2000.
- [5] Walt Kester, „Practical Design Techniques for Sensor Signal Conditioning, Bridge Circuits“, Analog Devices
- [6] Robert A. Witte, „Electronic Test Instruments: Analog and Digital Measurements“, Prentice Hall, 2002.
- [7] Vladislav Đ. Jovanović, „Elektrotehnika II: Električna merenja“, Naučna knjiga, Beograd, 1990.
- [8] „A-620A Standards: Requirements and Acceptance for Cable and Wire Harness Assemblies“, IPS/WHMA, 2002.

4.3. Mostne metode

- [9] Paul Horowitz, Winfield Hill, „The Art of Electronics (2nd edition)“, Cambridge University Press, 1989.
- [10] Filip Petrović, „Električna merenja I“, Naučna knjiga, Beograd, 1986.