

Organizaciona jedinica: Centar elektroenergetski objekti

Godina: 2009

MERNA NESIGURNOST PRI MERENJU ELEKTRIČNOG I MAGNETNOG POLJA INDUSTRIJSKE UČESTANOSTI

Urađeno za: CIGRE

Saradnici: Maja Grbić, Aleksandar Pavlović

1 UVOD

Rezultat svakog realnog merenja sadrži u sebi određenu nesigurnost, što znači da se idealno tačna vrednost merene veličine ne može saznati, ali je moguće, sa određenim stepenom poverenja utvrditi opseg u kojem se merena veličina nalazi. Merna nesigurnost je definisana kao parametar pridružen rezultatu merenja koji karakteriše disperziju vrednosti merene veličine. Uzroci merne nesigurnosti mogu biti veoma brojni i po pravilu se ne mogu svi uzeti u obzir. Pri određivanju merne nesigurnosti prvo treba identifikovati veličine koje utiču na rezultat merenja. Nakon određivanja veličina koje imaju značajan uticaj na rezultat merenja izračunavaju se pojedinačne komponente merne nesigurnosti i izražavaju kao standardna nesigurnost. Statistička sigurnost koja odgovara standardnoj mernoj nesigurnosti zavisi od raspodele verovatnoće koja se pripisuje datom merenju. Kada se izračunaju sve komponente, izražene kao standardna nesigurnost, kombinovana nesigurnost se izračunava kao kvadratni koren sume kvadrata ovih komponenata, pod uslovom da veličine koje utiču na rezultat nisu u korelaciji. Zatim se određuje proširena (ukupna) merna nesigurnost tako što se kombinovana nesigurnost pomnoži faktorom proširenja k , koji ima vrednost od $\sqrt{3}$ do 3, u zavisnosti od vrste raspodele. Kao krajnji rezultat obrade mernih podataka dobija se rezultat merenja, merna nesigurnost i statistička sigurnost sa kojom važe dobijeni podaci [3].

2 IZRAŽAVANJE MERNE NESIGURNOSTI

Kao što je napred rečeno, statistička sigurnost koja odgovara standardnoj mernoj nesigurnosti zavisi od funkcije raspodele verovatnoće koja je pripisana datom merenju.

2.1 Najvažnije funkcije raspodele verovatnoće rezultata merenja

Pri obradi rezultata merenja primenjuje se nekoliko vrsta raspodela, pri čemu su najčešće korišćene Gausova, ravnomerna (uniformna, pravougaona) i trougaona raspodela [3].

Za Gausovu raspodelu je karakteristično da je kriva simetrična oko srednje vrednosti (aritmetičke sredine rezultata merenja), što odgovara eksperimentalno utvrđenoj činjenici da su pozitivna i negativna odstupanja rezultata oko srednje vrednosti jednako verovatna.

Kod ravnomerne raspodele svaka vrednost unutar intervala raspodele je podjednako verovatna. Ovaj tip raspodele se najčešće primenjuje kada se raspoloža sa malo informacija o merenoj veličini.

Osnovna karakteristika trougaone raspodele je skoncentrisanost rezultata oko srednje vrednosti, što znači da su manja odstupanja rezultata od srednje vrednosti verovatnija od većih odstupanja. Trougaona raspodela se primenjuje u slučaju kada je izraženo grupisanje rezultata merenja oko srednje vrednosti.

2.2 Vrste merne nesigurnosti

2.2.1 Standardna merna nesigurnost

Standardna merna nesigurnost, u (engl. uncertainty - nesigurnost) je po definiciji jednaka standardnom odstupanju i dobija se kada se vrednost nesigurnosti podeli odgovarajućim koeficijentom. Vrednost ovog koeficijenta kod ravnomerne raspodele iznosi $\sqrt{3}$, a kod trougaone $\sqrt{6}$.

Postoje dva osnovna tipa merne nesigurnosti, tip A i tip B, koji se razlikuju po metodama određivanja nesigurnosti.

2.2.1.1 Standardna merna nesigurnost – Tip A

Merna nesigurnost tipa A postoji samo ako se radi o merenju koje je ponovljeno više puta i određuje se isključivo metodom statističke obrade podataka. Mernoj nesigurnosti tipa A se po pravilu pridružuje Gausova raspodela (nezavisno od raspodele kojoj pripadaju elementi uzorka).

2.2.1.2 Standardna merna nesigurnost – Tip B

Merna nesigurnost tipa B se može odrediti i kod pojedinačnog merenja, kada ne postoji merna nesigurnost tipa A. Merna nesigurnost tipa B se određuje svim ostalim metodama izuzev statističke analize. Pri tome se koriste svi raspoloživi podaci o korišćenju mernoj opremi, uverenje o etaloniranju, katalogi koje proizvođači daju uz instrument, teorijsko znanje i iskustvo eksperimentatora, podaci o uticaju parametara okruženja na merenje itd. Mernoj nesigurnosti tipa B se mogu pridružiti različite raspodele.

Tabela 1. Vrednosti koeficijenta proširenja k za razmatrane funkcije raspodele

Raspodela	Koeficijent proširenja k
Simetrična ravnomerna	1,73
Simetrična trougaona	2,45
Gausova	2 pri P=95 %
	2,58 pri P=99 %
	3 pri P=99,7 %

2.2.2 Kombinovana merna nesigurnost

Kombinovana merna nesigurnost se koristi u sledećim slučajevima:

- 1) kod ponovljenih merenja kod kojih su određene merne nesigurnosti tipa A i tipa B
- 2) kod merenja koja su izvršena jedanput, pri čemu ne postoji merna nesigurnost tipa A, ali na krajnji rezultat utiču nesigurnosti bar dve ili više uticajnih veličina.

Kombinovana merna nesigurnost u slučaju nekorelisanih veličina je data sledećim izrazom:

$$u_c = \sqrt{c_1^2 \cdot u_1^2 + \dots + c_i^2 \cdot u_i^2 + \dots + c_n^2 \cdot u_n^2} \quad (1)$$

Pri tome su $u_1, u_2, \dots, u_i, \dots, u_n$ komponente merne nesigurnosti izražene kao standardna nesigurnost, a $c_1, c_2, \dots, c_i, \dots, c_n$ koeficijenti osetljivosti. Dve veličine su nekorelisane, tj. statistički nezavisne, kada promene jedne od njih ne izazivaju predvidljive promene druge veličine.

2.2.3 Postupak izračunavanja merne nesigurnosti pri merenju električnog i magnetnog polja industrijske učestanosti

Prilikom izračunavanja merne nesigurnosti pri merenju električnog i magnetnog polja potrebno je prvo identifikovati veličine koje utiču na rezultat merenja. Ako je uticaj konstantan i može da bude izmeren, na merni rezultat treba primeniti korekcionni faktor sa njegovom nesigurnošću. Ukoliko to nije slučaj onda uticaj treba da bude uzet u obzir u vidu posebne komponente merne nesigurnosti. Kada se izračunaju sve komponente, izražene kao standardna nesigurnost, kombinovana nesigurnost se može izračunati kao kvadratni koren sume kvadrata ovih komponenta, pod uslovom da veličine koje utiču na rezultat nisu u korelaciji.

2.2.3.1 Komponente merne nesigurnosti pri merenju električnog polja industrijske učestanosti

U okviru ovog poglavlja navedeni su parametri za koje je uočeno da utiču na rezultat merenja električnog polja industrijske učestanosti. Pri merenju jačine električnog polja industrijske učestanosti uočen je uticaj više faktora koji predstavljaju potencijalni izvor merne nesigurnosti. Svakom od ovih faktora se pridružuje određena vrednost merne nesigurnosti koja se koristi pri izračunavanju proširene (ukupne) merne nesigurnosti. Najznačajniji faktori koji utiču na rezultate merenja jačine niskofrekventnog električnog polja su [1]:

- tačnost i stabilnost mernog instrumenta
- blizina operatera
- postolja merne sonde
- temperatura
- vlažnost vazduha
- prisustvo harmonijskih komponenta izvora polja
- neuniformnost električnog polja
- korona

Naravno, značaj pojedinih komponenta koje su ovde navedene i njihovo učešće u ukupnoj mernoj nesigurnosti zavisi od konkretnog slučaja. U tekstu koji

sledi detaljnije je objašnjena svaka od navedenih komponenta merne nesigurnosti.

Tačnost i stabilnost mernog instrumenta. Tačnost mernog instrumenta predstavlja jednu od osnovnih komponenta merne nesigurnosti. Ova komponenta se procenjuje na osnovu podataka datih u uverenju o etaloniranju. Da bi se poboljšala tačnost merenja na mereni rezultat se može primeniti korekcionni faktor zasnovan na podacima navedenim u sertifikatu o etaloniranju, koji obezbeđuje da se ponašanje instrumenta ne promeni sa vremenom.

Efekat blizine operatera. Uočeno je da prisustvo operatera u blizini sonde za merenje električnog polja dovodi do greške u merenju. Iz tog razloga merenje jačine električnog polja treba sprovesti tako da se uticaj operatera smanji na prihvatljiv nivo. Operater treba da se nalazi na određenom rastojanju od merne sonde da bi se ograničio njegov uticaj na rezultate merenja. Minimalno rastojanje je 1,5 m, a preporučena vrednost je 3 m. Eksperimentalno je utvrđeno da je pri merenju na visini od 1 m greška u merenju jačine električnog polja manja od 5 % kada je operater udaljen od merne sonde 1,5 m. U slučaju rastojanja između operatera i sonde od 3 m greška merenja je manja od 1 %, dok je za rastojanja veća od 4 m ovaj uticaj praktično zanemarljiv [1]. Smanjenje ovog uticaja postiže se tako što se merna sonda i instrument za merenje jačine električnog polja povezuju optičkim kablom koji ima dužinu od nekoliko metara. Komponenti merne nesigurnosti usled prisustva operatera može se pripisati ravnomerna raspodela verovatnoće.

Uticaj postolja merne sonde. Mereno električno polje može da bude poremećeno usled prisustva izolacionog postolja na koje je postavljena merna sonda. Da bi se prevazišao ovaj problem merna sonda može da bude postavljena na kraju horizontalnog nosača koji se montira na vrh postolja. Na ovaj način se postiže da sonda bude udaljena od vertikalne ose postolja za rastojanje koje je jednako dužini nosača, što dovodi do smanjenja uticaja postolja. Preporučuje se da merilo bude udaljeno od vertikalne ose postolja bar 0,5 m [1].

Na merenje električnog polja takođe utiču materijal i oblik postolja merne sonde. Činjenica da je postolje napravljeno od izolacionog materijala nije dovoljna da garantuje korektne merne rezultate, tako da treba obratiti pažnju da permitivnost ovog materijala bude bliska permitivnosti vazduha. Što se tiče oblika postolja merne sonde, pokazalo se da postolje u vidu tronošca unosi manju grešku od drugih vrsta postolja. Ukoliko se postolje korišćeno prilikom etaloniranja razlikuje od onog koje se koristi pri merenju ovaj uticaj takođe treba uzeti u obzir primenom korekcionnog faktora ili u vidu dodatne merne nesigurnosti. Komponenti merne nesigurnosti usled uticaja postolja se takođe može pripisati ravnomerna raspodela verovatnoće.

Uticaj temperature. Temperatura u toku merenja ne bi trebalo značajno da se razlikuje od ambijentalne temperature u vreme etaloniranja. Proizvođač merne opreme treba da naznači u kom opsegu temperature i vlažnosti vazduha instrument ima navedenu tačnost. Takođe bi pre početka merenja trebalo sačekati da se temperatura merila stabilizuje.

Vlažnost vazduha. Laboratorijska ispitivanja su pokazala da vlažnost vazduha može da utiče na sistem za merenje električnog polja ako je njena vrednost dovoljno velika da može da izazove kondenzaciju na senzoru i na izolacionom nosaču. Zbog toga se prevazilaženje ovog fenomena postiže sprečavanjem kondenzacije (npr. ako je temperatura merila veća od ambijentalne temperature, neće doći do pojave kondenzacije). Laboratorijska istraživanja su pokazala da povećanje relativne vlažnosti vazduha iznad 70 % značajno utiče na merenje električnog polja. Takođe je utvrđeno da je električno polje mereno u uslovima visoke vlažnosti uvek veće od stvarne vrednosti. Zbog toga su ovakva merenja prihvatljiva za proveru usaglašenosti sa graničnim vrednostima. Pri tome ako merena vrednost premaši graničnu to ne mora obavezno da znači da usaglašenost nije postignuta.

S obzirom da je drvo veoma osetljivo na vlagu, drvena postolja treba izbegavati u uslovima velike vlažnosti vazduha. Greška merenja usled ovog uticaja se takođe smanjuje upotrebom postolja sa horizontalnim nosačem za udaljavanje senzora od vertikalne ose postolja.

U svakom slučaju, ako se zahteva visoka tačnost merenja preporučuje se da se merenja ne vrše kada je vlažnost vazduha veća od dozvoljene.

Prisustvo harmonijskih komponenata izvora polja. Kada je potrebno proceniti harmonijski sastav polja neophodno je koristiti merilo koje ima mogućnost merenja harmonika. Proizvođač mernog instrumenta obično daje podatak za koji stepen učešća harmonika važi deklarirana tačnost.

Neuniformnost električnog polja. S obzirom da je merni instrument etaloniran u uniformnom polju greška se može javiti kada se vrši merenje polja koje nije uniformno. Uniformnost električnog polja najviše narušavaju provodni objekti koji se nalaze u blizini merne sonde. Provodni objekti utiču na raspodelu električnog polja i samim tim unose grešku u merenje, tako da ih treba udaljiti od merne sonde uvek kada je to moguće. U suprotnom ovaj uticaj treba uvažiti primenom korekcionog faktora ili dodatne merne nesigurnosti. Na merenje mogu da utiču čak i neprovodni objekti ukoliko je njihova relativna permitivnost veća od 1. Relativna devijacija između izmerenog i stvarnog polja u centru sonde se može smatrati zanemarljivom ako je rastojanje do objekta koji stvara poremećaj bar pet puta veće od dijagonale merne sonde.

Uticaj korone. Korona stvara lokalnu oblast jonizovanog vazduha u blizini provodnika pod visokim naponom. Zbog toga se ekvivalentni prečnik provodnika povećava, a lokalno električno polje se smanjuje. Kao posledica toga električno polje na nivou zemlje se malo povećava sa povećanjem intenziteta korone. Pokazalo se da su pojedinačni provodnici osetljiviji na ovaj fenomen od provodnika u snopu. Pojava korone je najizraženija pri kišovitom vremenu i u uslovima velike vlažnosti vazduha kada su merenja električnog polja nedovoljno tačna, što otežava ispitivanje ovog uticaja. Kao što je prethodno rečeno preporučuje se da se merenja jačine električnog polja ne vrše pri ovakvim vremenskim uslovima.

2.2.3.2 Komponente merne nesigurnosti pri merenju magnetnog polja industrijske učestanosti

Faktori za koje je uočeno da imaju najveći uticaj na merenje magnetnog polja industrijske učestanosti su [1]:

- pokretanje senzora
- vremenska konstanta mernog instrumenta
- neuniformnost raspodele magnetnog polja
- preslušavanje, neortogonalnost i relativni položaj kalemova sonde
- ambijentalno magnetno polje
- tačnost i stabilnost mernog instrumenta
- temperatura
- vlažnost vazduha
- prisustvo harmonijskih komponenti izvora polja

Pokretanje senzora. Sonde za merenje magnetnog polja su osetljive na brze pokrete, tako da se preporučuje držanje mernog instrumenta u statičnoj poziciji nekoliko sekundi, kako bi se ovaj uticaj sveo na minimum.

Vremenska konstanta mernog instrumenta. Iznadadne promene merenog polja mogu da dovedu do greške pri merenju zbog vremenske konstante mernog instrumenta. Do pogrešnog očitavanja može doći ako je pokazivanje merila očitano odmah nakon postavljanja sonde u jako polje ili ako je pokazivanje merila zabeleženo odmah nakon pomeranja sonde. Greške u očitavanju se takođe mogu javiti u slučaju promena polja usled brzih fluktuacija opterećenja u odnosu na brzinu odziva merila. U svakom slučaju, vremenska konstanta merila uvek treba da bude naznačena od strane proizvođača.

Neuniformnost raspodele magnetnog polja. Prisustvo provodnih i feromagnetnih objekata utiče na raspodelu magnetnog polja, što unosi dodatnu grešku u merenje. Iz tog razloga ove objekte treba udaljiti od merne sonde tokom sprovođenja merenja kad god je to moguće. U suprotnom ovaj uticaj treba uvažiti kao dodatnu komponentu merne nesigurnosti. Kada je polje veoma nehomogeno (npr. blizu nepokretnih feromagnetnih objekata) greška usrednjavanja može da se poveća usled dimenzija sonde u odnosu na varijacije polja u prostoru. Ako je sonda dovoljno daleko od objekata (bar 1 m), može se smatrati da je ova greška zanemarljiva.

Preslušavanje, neortogonalnost i relativni položaj kalemova sonde. Neortogonalnost tri kalema koji čine sondu, preslušavanje i razlike u osetljivosti između njih mogu da dovedu do dodatne nepreciznosti, što se može izmeriti tokom testova pri etaloniranju. Ukoliko se merenje magnetnog polja vrši ispod dalekovoda, instrument treba držati tako da pri svim merenjima ima istu orijentaciju u odnosu na naponski vod, čime se postiže da ova greška ima konstantnu vrednost u toku merenja.

Ambijentalno magnetno polje. Vrednost ambijentalnog magnetnog polja se može odrediti merenjem kada izvor zračenja nije opterećen, naravno ukoliko je to moguće. Ovaj uticaj se može uvažiti primenom korekcionog faktora za koji se usvaja ravnomerna raspodela verovatnoće.

Ostale komponente merne nesigurnosti su već opisane u prethodnom odeljku. Mnogi parametri koji utiču na merenje električnog polja nisu od značaja pri merenju magnetnog polja. Prisustvo operatera, kao i prisustvo većine objekata ne utiče na merenje magnetnog polja industrijske učestanosti. Usled toga većina mernih instrumenata su uređaji koji se drže u ruci prilikom merenja. Zbog toga korišćenje postolja nije neophodno

pri merenju magnetnog polja, ali može da bude korisno za precizno pozicioniranje sonde u prostoru.

Kada se identifikuju svi parametri koji utiču na rezultat merenja i izračunaju njima odgovarajuće merne nesigurnosti, kombinovana nesigurnost se izračunava primenom izraza (1). Nakon toga se pristupa izračunavanju ukupne (proširene) merne nesigurnosti.

2.2.4 Proširena merna nesigurnost

Proširena merna nesigurnost U predstavlja proizvod kombinovane standardne merne nesigurnosti i koeficijenta proširenja k :

$$U = k \cdot u_c \quad (2)$$

Koeficijent k može imati vrednost u intervalu od $\sqrt{3}$ do 3, zavisno od usvojene raspodele. Proširenoj mernoj nesigurnosti odgovara visoka vrednost statističke sigurnosti, između 95 % i 99,7 %, što znači da se merena veličina sa velikom sigurnošću nalazi u intervalu $x_s \pm U$

(x_s - srednja vrednost uzorka od n rezultata merenja)

[3]. Određivanje standardne kombinovane merne nesigurnosti i proširene kombinovane merne nesigurnosti predstavlja krajnji cilj obrade mernih podataka.

3 ZAKLJUČAK

U radu su opisani izvori merne nesigurnosti za koje je uočeno da imaju najveći uticaj na rezultate merenja električnog i magnetnog polja industrijske učestanosti. Za svaki od ovih uticaja se izračunava vrednost merne nesigurnosti pri čemu učešće pojedinih komponenata u ukupnoj (proširenoj) mernoj nesigurnosti zavisi od konkretnog slučaja. Na osnovu uputstava iznetih u radu može se zaključiti kako se uticaj pojedinih komponenata na rezultat merenja može svesti na minimum. Takođe, podaci izneti u radu predstavljaju polaznu osnovu za procenu ukupne merne nesigurnosti u svakom konkretnom slučaju merenja jačine električnog i magnetnog polja industrijske učestanosti u praksi, što predstavlja i glavni cilj rada.

LITERATURA

1. CIGRE Working Group C4.203: „Technical guide for measurement of Low Frequency Electric and Magnetic Fields near Overhead Power Lines”, April 2009.
2. Aleksandar Pavlović, Maja Grbić: „Merna nesigurnost pri mernju visokofrekventnog elektromagnetnog polja”, Zbornik radova Instituta „Nikola Tesla”, Beograd, 2010. god.
3. Dragan Stanković, Predrag Osmokrović: „Praktikum laboratorijskih vežbi iz fizike”, Beograd, 2004.
4. Accredited laboratory SAC-SINGLAS: „Guidelines on the Evaluation and Expression of Measurement Uncertainty for Electrical Testing Field”, 2002.
5. BS EN 50413: „Basic standard on measurement and calculation procedures for human exposure to electric, magnetic and electromagnetic fields (0 Hz – 300 GHz)”, 2009.
6. Branislav Vulević, Predrag Osmokrović: „Evaluation of uncertainty in the measurement of environmental electromagnetic fields”, Radiation Protection Dosimetry, 2010.
7. Branislav Vulević: „Procena merne nesigurnosti kod određivanja nivoa elektromagnetskih polja u životnoj sredini”, Doktorska disertacija, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, 2010.
8. M. Borsero, G. Crotti, L. Anglesio, G. d' Amore: „Calibration and evaluation of uncertainty in the measurement of environmental electromagnetic fields”, Radiation Protection Dosimetry, 2001, Vol. 97, No. 4, pp. 363-368.
9. G. Basso: „Uncertainty in the measurement of electromagnetic field with isotropic broadband sensor and selective E&H field analyzer”, Narda Safety Test Solution.
10. United Kingdom Accreditation Service: „The Expression of Uncertainty and Confidence in Measurement”, January, 2007.
11. European co-operation for Accreditation: „Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration”, December, 1999.