

NAČRTOVANJE NOVIH SREDNJE NAPETOSTNIH INDIKATORJEV NAPETOSTI S POMOČJO IZRAČUNA ELEKTRIČNEGA POLJA

I. Tičar, P. Kitak, J. Pihler

Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Maribor

Ključne besede: EES sistem elektroenergetski, napetost električna, napetost srednja, napetost električna 125 kV, naprave stikalne, indikatorji napetosti, enote elektronske, delilniki napetosti kapacitivni, polja električna, izračuni, izolatorji podporni, IEC 61985 standardi, IEC 61243-5 standardi

Izveček: Indikatorji napetosti se uporabljajo za indikacijo prisotnosti napetosti. Sestavljajo jih običajno trije epoksidni podporni izolatorji, v katere so vgrajeni kapacitivni delilci visoke napetosti in indikatorska elektronska enota. Izolatorji so vgrajeni v stikalnem aparatu ali drugem dovodnem elementu na katerem je prisotna napetost.

Novi IEC standardi so, za indikatorje napetosti, ki v popolnosti zagotavljajo breznapetostno stanje, definirali potrebno kapacitivnost delilca napetosti, ki je nekajkrat večja kot pri dosedanjih izvedbah. To se lahko doseže le s povečanjem površine elektrod kapacitivnega delilca, s tem pa močno naraste električna poljska jakost znotraj in ob izolatorju. S pomočjo izračuna električnega polja so bile izbrane elektrode indikatorjev napetosti, ki zadovoljujejo opisanim zahtevam in sočasno omogočajo najugodnejšo porazdelitev električne poljske jakosti.

Optimizirana je bila modificirana izvedba sedanjega indikatorja napetosti, zasnovana pa je bila tudi nova izvedba.

Izračuni električne poljske jakosti so bili potrjeni na prototipih podpornih izolatorjev.

Design of New Medium Voltage Indicator by Means of Electric Field Calculation

Key words: electrical power system, electrical voltage, medium voltage, electrical voltage 125 kV, switchgears, voltage indicators, electronic units, capacitive voltage dividers, electric fields, calculations, supporting insulators, IEC 61985 standards, IEC 61243-5 standards

Abstract: Voltage indicators are used in medium voltage switchgears for indication of voltage presence. They consist of three epoxy insulators with a capacitive voltage dividers, indicator electronic unit, the input of which is connected to the divider's output, LE diode for indication of the presence of voltage and push-button for checking the correctness of indicator's operation.

For the voltage indicators that entirely ensure conditions without voltage (shielded invisible parts), the new IEC standards define necessary capacitance, which is much higher than in previously made indicators. This is necessary due to the fact, that for a reliable operation of the voltage indicator to have sufficient electric current. The terminals of voltage indicators that fulfil the above described requirements have been selected on the basis of electric field calculations. These calculations have also been used for achieving the most suitable electric field strength distribution. The old version of voltage indicator has been optimised and modified. The concept of a new version has also been developed.

For solving 3D electromagnetic problems using finite element method the program package Electromagnetic Field Analysis Tools (EleFAnT3D) has been used. 3D graphical pre-processor enables inputting of 3D structures, boundary conditions, sources and data on materials used. Data input phase is followed by running the computations and presentation of results in graphical and numerical form.

The results of electric field calculations and optimisation have shown that for the existing layout of supporting insulator's electrodes (Figure 16) the strongest electric field is in the upper part (Figure 12) and oriented towards the outside of insulator (Figure 13). In this part there is also the connection and in the case of voltage increase there is a possibility of a flashover.

In the newly designed concept of supporting insulator's electrodes (Figure 17) the strongest electric field is in the bottom part (Figure 14), where it almost reaches the dielectric strength of air. Nevertheless, this distribution is more suitable since the electric field is oriented towards the inside of the insulator (Figure 15) – dielectric strength of epoxy is ten times higher than the dielectric strength of air.

The calculations of electric field have been verified with measurements on the prototype of the insulators.

1. Uvod

Izolatorji iz epoksidnih smol imajo zelo dobre izolacijske, mehanske in termične lastnosti, ter veliko odpornost na različne kemikalije. Odlikujejo se tudi po malih dimenzijah, zahtevnih oblikah in dolgi življenjski dobi.

V stikalnih napravah so uporabljeni kot izolacijski (električno izoliranje prevodnih delov od ozemljenih) in konstrukcijski (mehansko pritrdjevanje elementov stikalnega aparata ali vodnikov) elementi.

Podporne izolatorje uporabljamo tudi za indikacijo napetosti v srednjenapetostnih stikalnih napravah. Pri tem imamo

vedno vidno informacijo o prisotni napetosti, kar nam omogoča:

- povečano varnost posluževalcev,
- preprečitev napačne manipulacije in
- povečano zanesljivost delovanja električnih postrojev.

Elektrode indikatorjev napetosti se za srednjenapetostne notranjemontažne naprave običajno vgradijo v podporne izolatorje na stikalnem aparatu ali drugem dovodnem elementu na katerem je prisotna napetost.

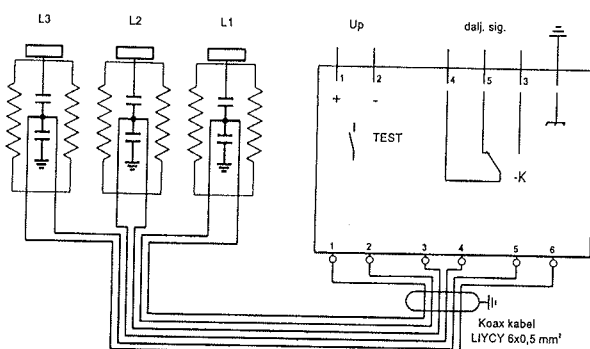
Dosedanji podporni izolatorji z vgrajenimi kapacitivnimi delilci so zgrajeni tako, da imajo majhno kapacitivnost. Do

sedaj ni bilo nobenih omejitev. Nov standard IEC 61985 v osnovni opredelitvi zahteva, da je stikalna naprava zagotovo v breznapetostnem stanju, opredeljenim z indikatorjem napetosti le, če je izdelana v skladu z IEC 61243-5, ki podaja vrednosti zahtevane kapacitivnosti. Proizvajalec mora to posebej navesti. Po zahtevi standarda morajo biti dosežene kapacitivnosti med 74 in 88 pF. Zato je potrebno vse dosedanje delilce napetosti v podpornih izolatorjih konstruirati tako, da so izpolnjene zahteve standarda. To smo izvedli tako, da smo s pomočjo izračuna električnega polja optimizirali elektrode kapacitivnega delilca napetosti, medtem ko ostane zunanost izolatorja nespremenjena.

2. Indikatorji napetosti

Trifazni indikatorji napetosti zaslonjenih delov pod napetostjo se uporabljajo v srednjenapetostnih stikalnih napravah v katerih so elementi pod napetostjo zakriti s pregradami tako, da jih ni mogoče videti pri normalnem delovanju. To je v vseh kovinsko oklopljenih in kovinsko ali izolacijsko pregrajenih stikalnih celicah in drugih električnih napravah.

V srednjenapetostnih stikalnih celicah indikator sestavljajo trije epoksidni podporni izolatorji standardne oblike, v katerih so vgrajeni kapacitivni delilci visoke napetosti in indikatorska elektronska enota v ohišju (slika 1). Le-ta ima obliko standardnega merilnega instrumenta za vgradnjo. Na čelni plošči enote so svetlobne diode, ki z utripanjem kažejo prisotno napetost vsake faze posebej. Na njej je tudi tipka za testiranje neprekinjenosti povezav indikatorske enote s kapacitivnimi delilci v podpornih izolatorjih in pravilnega delovanja same enote.



Slika 1: Shematski prikaz indikatorja napetosti

V indikatorski elektronski enoti je vgrajen tudi pomožni rele s preklopnim kontaktom, ki služi za daljinsko signalizacijo prisotnosti visoke napetosti. Ko pride do ugasnitve oziroma utripanja diod, rele s časovno zakasnitvijo preklopi, tudi pri testiranju indikatorja, če le-to traja dalj časa. Da se izognemo vplivu visokofrekvenčnih motenj iz pomožnega napetostnega izvora, je izvedeno napajanje indikatorja z, v njegovi enoti vgrajenim, DC/DC pretvornikom. Za preprečevanje motilnih vplivov drugih visokonapetostnih in visokofrekvenčnih polj je potrebno povezati indikatorsko elektronsko enoto s podpornimi izolatorji (delilci napetosti) z

oklopljenim vodnikom. Njegova dolžina ne sme biti prevelika, da ne bi prišlo do prevelikega slabljenja koristnega signala.

Druge vrste indikatorjev visoke napetosti so enofazni vtični indikatorji, ki se uporabljajo v kombinaciji s kapacitivnim delilcem napetosti v srednjenapetostnih stikalnih napravah. Ne potrebujejo pomožnega napajanja, so enostavnejši in zato cenejši. Za izvor svetlobe je uporabljena tlivka. V stikalno celico je potrebno vgraditi le ustrezne podporne izolatorje z vgrajenimi kapacitivnimi delilci in namestiti na vrata nizkonapetostne krmilne omarice tri enofazne vtičnice ter jih s koaksialnim kablom medsebojno povezati. Vtičnice so v normalnem obratovanju kratko spojene s kratkostičniki. Pri ugotavljanju prisotne napetosti je potrebno kratkostičnike izvleči iz vtičnic in na njihovo mesto vtakniti indikator.

3. Izračun elektromagnetnega polja

Elektromagnetno polje opišemo z osnovnimi Maxwellovi enačbami:

$$\begin{aligned}\nabla \times \mathbf{H} &= \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{D} &= \rho\end{aligned}\quad (1)$$

kjer pomeni:

$\mathbf{H}$ – vektor magnetne poljske jakosti,
 $\mathbf{J}$ – vektor gostote električnega toka,
 $\mathbf{D}$ – vektor gostote električnega pretoka,
 $\mathbf{B}$ – vektor gostote magnetnega pretoka,
 $\mathbf{E}$ – vektor električne poljske jakosti,
 ρ – prostorninska gostota naboja.

V poljubnem prostorskem področju Ω , ki ga omejuje rob Γ (slika 2) opisujejo stacionarno električno polje naslednje enačbe:

$$\begin{aligned}\mathbf{D} &= \epsilon \mathbf{E} \\ \nabla \cdot \mathbf{D} &= \rho \\ \nabla \times \mathbf{E} &= \mathbf{0}\end{aligned}\quad (2)$$

Na robnih ploskvah lahko uporabimo Dirichletove (Γ_1), ali Neumannove (Γ_2) robne pogoje, odvisno od reševalnega primera:

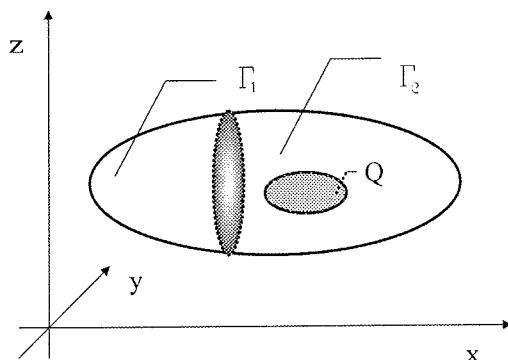
- na delu roba Γ_1 , ki omejuje območje Ω velja za tangencialno komponento $\mathbf{E}$:

$$\mathbf{E} \times \mathbf{n} = \mathbf{0} \quad (3)$$

- na robu Γ_2 , območja Ω pa velja za normalno komponento gostote električnega pretoka:

$$\mathbf{D} \cdot \mathbf{n} = 0 \quad (4)$$

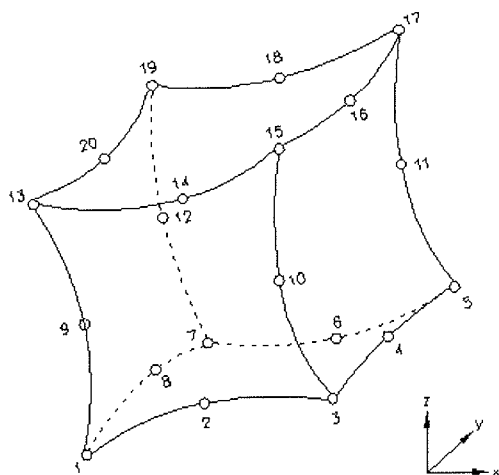
Območje Q predstavlja področje električnih izvorov.



Slika 2: Opazovano področje z danimi izvori in robnimi vrednostmi

Tako postavljeni problem rešujemo z metodo končnih elementov (MKE). V praksi uporabljamo za reševanje tridimenzionalnih problemov tetrahedralne in heksahedralne elemente. V našem primeru smo za predstavitev 3D geometrije modela uporabili končne elemente drugega reda, z dvajsetimi vozlišči. Ti elementi omogočajo tudi modeliranje ukrivljenih struktur.

Slika 3 predstavlja tak element z oštevilčenimi vozlišči.



Slika 3: 20-vozliščni heksaedralni element v globalnem koordinatnem sistemu

4. Optimiranje elektrod kapacitivnega delilca napetosti s pomočjo izračuna električnega polja

Elektrode kapacitivnega delilca, nameščene znotraj podpornega izolatorja, običajno tvorijo kovinski vložki za pritrdjevanje na obeh straneh izolatorja in cilindrična elektroda, izdelana iz kovinske mrežice ali pločevine. Kovinski vložki lahko imajo tudi privarjene elektrode posebnih oblik.

Konkretni primer smo računsko reševali s programskim paketom **Electromagnetic Field Analysis Tools**, ki so ga razvili na IGTE, TU Graz (EleFAnT3D). Program je namenjen

reševanju tridimenzionalnih problemov elektromagnetnega polja z uporabo metode končnih elementov.

Program omogoča reševanje:

- *stacionarnih* (elektrostatična, tokovna, magnetna polja) in
- *časovno odvisnih* (vrtinčni tokovi, toplotna polja) elektromagnetnih in toplotnih polj.

3D grafični predprocesor omogoča vnos vrste in geometrije problema, robnih pogojev, materialov in virov.

Glavni program - t.i. *solver* omogoča različne matematično-numerične možnosti izračuna (skalarni potencial, vektorski potencial, $T-Q...$), odvisno od vrste in oblike problema. Tako lahko iščemo rešitve v posameznih vozliščih končnih elementov ali pa po robovih, kjer uporabljamo robovne elemente, kot posebni primer Whitney-evih elementov. Zadnje pride posebej v poštev pri reševanju problemov magnetnega polja.

Postprocesor omogoča tako numerični kot 3D ali 2D grafični prikaz skalarnih in vektorskih veličin reševanega problema v celoti ali delno. Dodatno postprocesiranje v konkretnem primeru omogoča izračun volumnskega integrala danega problema in s tem velikost nakopičene energije v izbranem materialu. Na osnovi le-te lahko izračunamo kapacitivnost, ki jo v našem primeru iščemo, s pomočjo enačb:

$$C = \frac{Q}{U} \quad (5)$$

$$C = \frac{2W}{U^2} \quad (6)$$

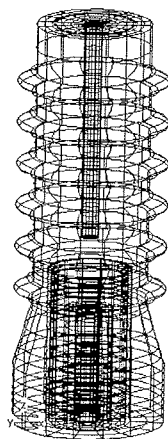
pri čemer pomeni:

C - kapacitivnost,
 Q - el. naboj,
 U - napetost,
 W - električna energija.

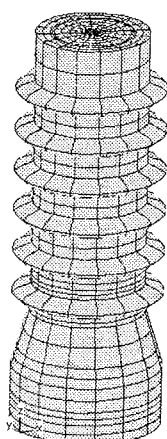
5. Prikaz rezultatov

Vsi izračuni električnega polja so narejeni pri preskusni napetosti 125 kV. Na slikah, ki prikazujejo električno polje, je velikost tega označena na desni strani. Povsod kjer je polje večje od te vrednosti je izolacijski material bele barve.

Zgornja meja polja, ki je še dovoljena, da ne pride do preboja ali preskoka se imenuje prebojna ali preskočna trdnost. Prebojna trdnost epoksidne izolacije znaša 30 MV/m in ni bila nikjer presežena. Največje vrednosti polja v epoksidni izolaciji so se pojavljale med elektrodo povezano s kovinskim vložkom in mrežico. Vzrok je relativno majhna razdalja med tema dvema elementoma in velika potencialna razlika. Problemi so se pojavili tudi na prehodu polja iz epoksidne izolacije v zrak (prebojna trdnost zraka je 3 MV/m) zaradi velike vrednosti električne poljske jakosti na koncu mrežice.



Slika 4: Struktura konč. elem. podpornega izolatorja



Slika 5: Struktura z mrežo in vidnimi materiali podpornega izolatorja

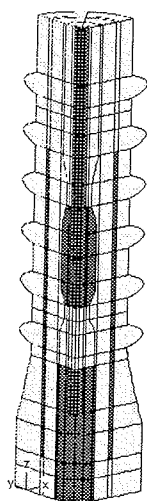
Na sliki 4 je prikazana struktura končnih elementov na sliki 5 pa struktura z mrežo in vidnimi materiali podpornega izolatorja. Zaradi osne simetrije izolatorja, boljšega pregleda rezultatov in enostavnosti izračuna, bodo v nadaljevanju vsi izračuni električnega polja opravljeni za 1/4 podpornega izolatorja.

Optimizacija z izračuni električnega polja bo prikazana za dva tipa podpornih izolatorjev in sicer:

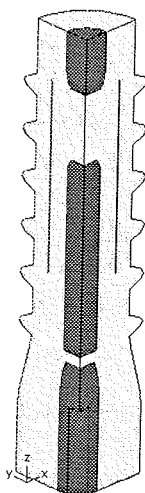
- modificirana izvedba sedanjih elektrod in
- nova izvedba elektrod.

Na sliki 6 je prikazan sedanji 24 kV podporni izolator za indikacijo visoke napetosti. Zgornja elektroda (in hkrati priključek) je na potencialu 125 kV, mrežica pa na potencialu 0 V.

Slika 7 prikazuje novo konstruiran podporni izolator, ki ima elektrodo na potencialu 0 V, medtem ko je na mrežici in zgornjem priključku potencial 125 kV



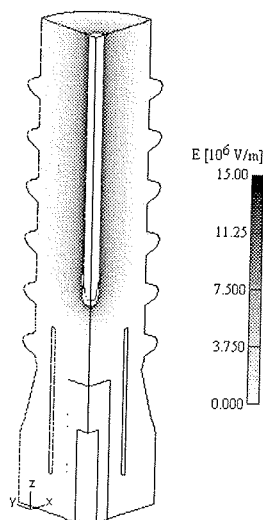
Slika 6: Modificirana strukt. sedanjega izolatorja



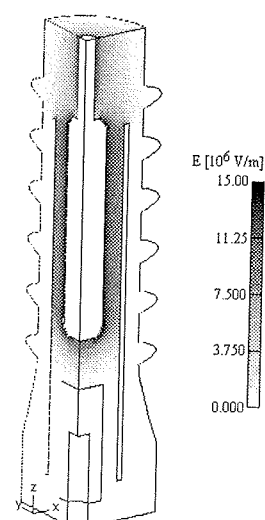
Slika 7: Izvedba novih elektrod izolatorja

Podporni izolatorji z elektrodami dosežanje izvedbe

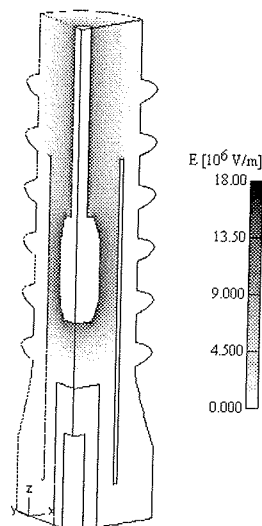
Na sliki 8 je prikazana električna poljska jakost podpornih izolatorjev z dosežanjem izvedbo elektrod. Vidimo, da v epoksidni izolaciji ni presežena prebojna trdnost 30 MV/m, kakor tudi ne v zraku 3 MV/m. Problem je kapacitivnost, ki znaša za to obliko 12 pF, po IEC 61243-5 pa se zahteva od 74 do 88 pF. Zato bo v nadaljevanju sledil prvi primer optimizacije tega podpornega izolatorja; mrežica se dvakrat podaljša, zgornja elektroda pa se odebeli na dvakratno vrednost po skoraj celotni dolžini. Vrednost električne poljske jakosti je prikazana na sliki 9. V epoksidni izolaciji vrednosti ne presegajo 20 MV/m, v zraku pa ni polje večje kot 1.5 MV/m. Vrednost kapacitivnosti še vedno ni v zahtevanih mejah.



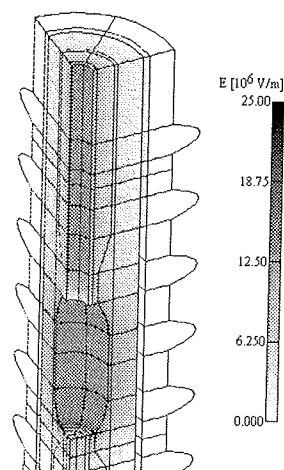
Slika 8: Električna poljska jakost sedanjega podpornega izolatorja



Slika 9: Električna poljska jakost podpornega izolatorja z odebeljeno elektrodo



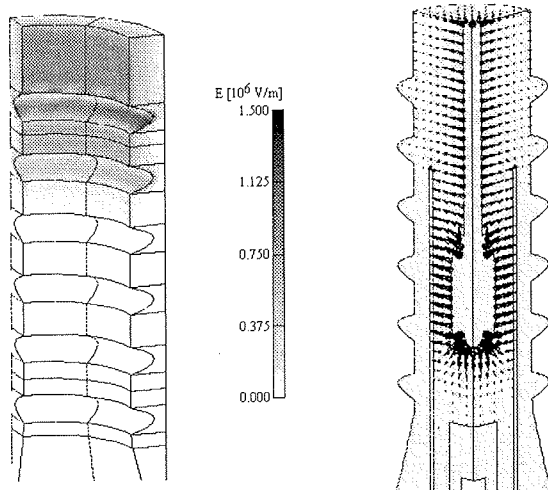
Slika 10: Električna poljska jakost izolatorja, ki odgovarja zahtevam IEC



Slika 11: Prikaz električne poljske jakosti brez kovinskih materialov

Naslednji korak optimizacije je bil skrajšanje odebeljenega konca elektrode samo na spodnji del in 20 odstotno povečanje premera. Kapacitivnost se je povečala na 83 pF, kar je dovolj glede na zahteve IEC. Električno poljsko jakost celotnega podpornega izolatorja prikazuje slika 10, na sliki 11 pa je prikazano polje v notranjosti epoksidne izolacije (brez kovinskih materialov). Vrednosti električne poljske jakosti niso nikjer presegle prebojnih trdnosti.

Tudi v 1 cm debeli plasti zraka okoli podpornega izolatorja (slika 12) električna poljska jakost ne presega prebojnih trdnosti. Na sliki 13 pa je vektorski prikaz električne poljske jakosti



Slika 12: Električna poljska jakost v zraku okoli zgornjega dela izolatorja Slika 13: Vektorski prikaz električne poljske jakosti

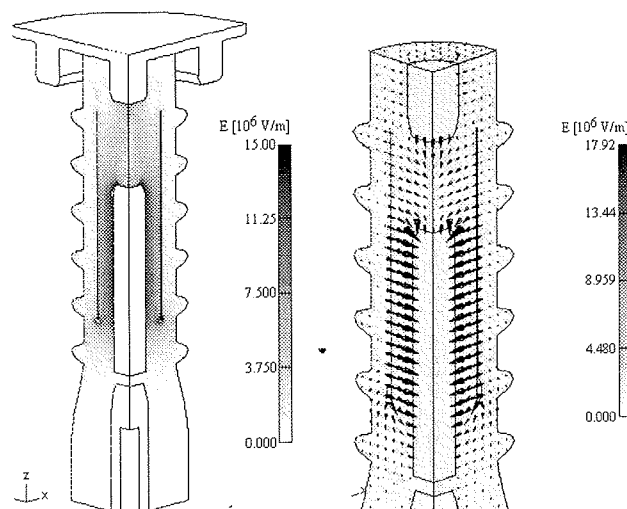
Podporni izolatorji z novo izvedbo elektrod

Iz izračunov polja v dosedanjih primerih vidimo, da je zunanost izolatorja zgoraj bolj obremenjena (večji E). Čeprav električna poljska jakost nikjer ne presega prebojne trdnosti, se pojavljajo največje vrednosti polja na vrhu mrežice. Dodatno se še lahko pojavijo problemi s prebojno trdnostjo, ker je na zgornji strani tudi priključek in bi prišlo še prej do preboja. Zato bi bilo za obratovanje ugodneje, če bi se večja vrednost električne poljske jakosti prenesla v spodnji del izolatorja.

V nadaljevanju je prikazan podporni izolator z novo razporeditvijo elektrod, ki bo imel zgornji priključek in mrežico na potencialu 125 kV, posebej oblikovano elektrodo in spodnji priključek pa na 0 V.

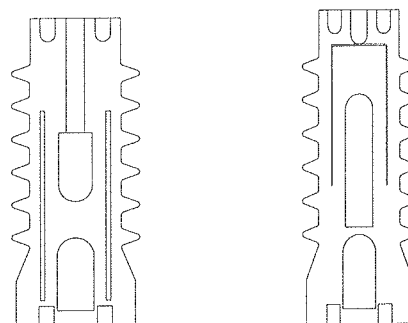
Optimizacijo smo izvajali na podoben način kot v prvem primeru. Spremenljivke so bile dolžina in premer mrežice ter premer in dolžina srednje elektrode. V najugodnejšem primeru smo dosegli kapacitivnost 82 pF, kar odgovarja standardu IEC. Prikaz električne poljske jakosti za ta optimalni primer prikazujeta sliki 14 in 15. Slika 14 prikazuje

električno poljsko jakost podpornega izolatorja, ko smo na zgornjem delu dodali priključek (približek dejanskemu stanju). Vidimo, da priključek (na potencialu 125 kV) ugodno vpliva na razporeditev električne poljske jakosti zunaj izolatorja. Prebojna trdnost je na spodnjem delu mrežice na prehodu v zrak na mejni vrednosti 3 MV/m in ni bila presežena



Slika 14: Električna poljska jakost v zgornjem delu podpornega izolatorja Slika 15: Vektorski prikaz električne poljske jakosti izolatorja z novimi elektr.

Sliki 16 in 17 prikazujeta načrt podpornega izolatorja v pre-rezu po optimizaciji. Na sliki 16 je modificirana oblika elektrod dosedanjega indikatorja napetosti (podpornega izolatorja), ki odgovarja zahtevam standarda IEC. Slika 17 pa prikazuje primer razporeditve elektrod novo zasnovanega indikatorja napetosti v skladu s standardom IEC.



Slika 16: Optimizirana oblika 24 kV izolatorja z modif. sedanjimi elektrodami Slika 17: Optimizirana oblika 24 kV izolatorja z novimi elektrodami

6. Sklep

Iz poteka optimiziranja obeh tipov podpornih izolatorjev vidimo, da se je dolžina mrežice povečala, prav tako pa se je povečala debelina zgornje elektrode. S tem so se zmanjšale razdalje med posameznimi elementi, povečala pa se je vrednost električne poljske jakosti. Vendar so izračuni električnega polja pokazali, da električna poljska jakost ni nikjer presegla prebojnih trdnosti in sicer za epoksidno izolacijo 30 MV/m in za zrak 3 MV/m.

Rezultati izračuna električnega polja in optimiranja so pokazali, da je pri sedanji razporeditvi elektrod podpornega izolatorja (slika 16) polje največje v zgornjem delu izolatorja (na koncu mrežice - slika 12 in je usmerjeno navzven (slika 13). Poleg tega je na tem delu tudi priključek in bi pri povečani napetosti lahko prišlo do preboja.

Na podpornem izolatorju z novo zasnovanimi elektrodami (slika 17) je polje največje v spodnjem delu izolatorja (konec mrežice - slika 14) in je na meji prebojne trdnosti. Vendar je ta razporeditev ugodnejša, ker je polje usmerjeno navznoter (slika 15) - prebojna trdnost epoksida je desetkrat večja od prebojne trdnosti zraka.

Po opravljenih izračunih so bili v tovarni TSN Maribor izdelani prototipi podpornih izolatorjev z elektrodami kapacitivnih delilcev. Posamezni izolatorji so bili že testirani, potrebno pa je opraviti še preskuse znotraj stikalne celice.

7. Zahvala

Avtorji se zahvaljujemo TSN Tovarni stikalnih naprav Maribor za sodelovanje pri nalogi in za izdelavo prototipov epoksidnih izolatorjev.

8. Literatura

- /1/ O. Biro, K. R. Richter, "CAD in Electromagnetism, Advances in Electronics and Electron Physics", Vol. 82, Academic Press Inc., 1991.
- /2/ Programski paket ELEFANT 3D-IGTE-TU Graz, Graz 2000.
- /3/ J. Pihler, Stikalne naprave elektroenergetskega sistema, Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, str. 1-273, Maribor, 1999.
- /4/ IEC 61243-5 Voltage detectors- Voltage detecting systems (VDS) 1997-06.
- /5/ IEC 61985 High-voltage prefabricated switchgear and controlgear assemblies-Voltage presence indicating systems, 2000-11.

Izr. prof. dr. Igor Tičar

Izr. prof. dr. Jože Pihler

Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko,
računalništvo in informatiko,
Smetanova 17, 2000 Maribor
Telefon: +386 02 2207080
E-mail: ticar@uni-mb.si; joze.pihler@uni-mb.si

Peter Kitak univ. dipl. inž.

TSN Maribor, Šentiljska cesta 49, 2000 Maribor

Prispelo (Arrived): 20.11.2001

Sprejeto (Accepted): 25.04.2002