DETEKCIJA GORLJIVIH PLINOV V ENERGETSKIH TRANSFORMATORJIH

Robert MARUŠA, Jože VORŠIČ, Jože PIHLER, Blaž ZUPAN,
Tim GRADNIK, Lovro BELAK, Rado FERLIČ

POVZETEK

V članku je predstavljena nadgradnja obstoječega plinskega (Buchholz) releja, ki se uporablja za detekcijo okvar in zaščito energetskih transformatorjev. Nadgradnja se navezuje na senzorski nadzor gorljivih plinov v Buchholz releju, ki se formirajo ob okvarah v aktivnem delu transformatorja. V prvem delu članka sta opisana problematika nastajanja gorljivih plinov v olju kot posledica okvar v navitjih ali jedru, ter mehanizem vdora zraka v Buchholz rele zaradi nepopolnega tesnjenja dilatacijskega sistema transformatorja ali vnosa zraka pri vzdrževalnih delih. V drugem delu je prikazana simulacijska naprava za detekcijo gorljivih plinov in podana uporabna vrednost izboljšave plinskega releja z vgradnjo detektorja gorljivih plinov. V zadnjem delu je opisano delovanje detektorja in avtomatike za prenos in obdelavo senzorskih podatkov. Predstavljene so tudi praktične prednosti in možnosti, ki jih vgradnja detektorja prinaša pri različnih tipskih močeh transformatorjev, izvedena je tudi ocena stroškov vgradnje in povečanje obratovalne zanesljivosti transformatorja.

DETECTION OF COMBUSTIBLE GASES IN THE POWER TRANSFORMER

ABSTRACT

The paper presents an upgrade of existing gas (Buchholz) relay with a gas detection device, which is used for fault detection and protection of power transformers. The upgrade refers to a sensor for detection of combustible gases in (Buchholz) relay, which are formed during thermal and electrical defects in active parts of power transformer. In the first part paper focuses on describing mechanisms of production of combustible gases in oil, as well as intrusion of air bubbles into transformer tank due to leaking dilatation system. The second part provides description of the simulation setup for testing performance of the gas detection device in real-life conditions. The final section describes the sensor and automation of the transfer and processing of measurement data. It also presents useful practical advantages and opportunities that the upgrade brings for various transformer sizes as well as provides an estimate of installation costs and benefits through analysis of operational reliability increase of the upgraded transformer.

1. UVOD

Energetski in distribucijski transformatorji so osnovni vezni člen med proizvajalci, omrežjem in porabniki električne energije v elektroenergetskem sistemu. Transformatorji so vgrajeni tako na strani proizvajalcev kot veliki blok transformatorji, v prenosnih visokonapetostnih omrežjih 400/220 in 110 kV, distribucijskih omrežjih 110/35/20/10 kV, kakor tudi na ravni SN/0,4 kV transformatorjih, ki oskrbujejo gospodinjstva in industrijo z električno energijo.

Transformator je osnovni gradnik omrežja, namenjen prilagajanju ustreznega napetostnega nivoja na različnih ravneh omrežja elektroenergetskega sistema. Elektromagnetno indukcijo, kot osnovni mehanizem transformacije električne napetosti je izumil *Michael Faraday* že leta 1831. Do svojega imena, patenta in realizacije pa je transformator kot uporaben električni stroj prvič prišel leta 1885 v tovarni Ganz v soavtorstvu treh inženirjev (Zipernovsky, Deri, Blathy).

V prvotno izdelanih transformatorjih je bil uporabljen izolacijski sistem papir-zrak. Takšnih transformatorjev zaradi neučinkovitega hlajenja navitij s pomočjo zračne konvekcije ni bilo mogoče uporabljati v izvedbah večjih nazivnih moči, kot tudi ne v izvedbah višjih napetostnih nivojev zaradi neustreznih dielektričnih lastnosti zraka. V drugi polovici 20. stoletja je olje zaradi odličnih dielektričnih, hladilnih in kemijskih lastnosti pri velikih energetskih transformatorjih povsem nadomestilo zračno izolirane in hlajene transformatorje.

2. VLOGA OLJA V IZOLACIJSKEM SISTEMU TRANSFORMATORJA

Glavni materiali za zagotavljanje dobrih izolacijskih lastnosti v transformatorju so trdni dielektriki - papir, lak, tlačena lepenka ter transformatorsko olje, ki je tekoči dielektrik. Trdni dielektriki zagotavljajo visoko relativno dielektrično trdnost, transformatorsko olje pa mora poleg dielektrične funkcije omogočati tudi enakomerno odvajanje toplote iz aktivnih delov transformatorja proti kotlu in hladilnem sistemu transformatorja. Transformatorsko olje ima poleg hladilne in izolacijske funkcije tudi zelo pomembno sporočilno vrednost o stanju transformatorja, saj količina raztopljenih plinov in sluzi v transformatorskem olju poda pri podrobni kemični in kromatografski analizi realno sliko o kvaliteti izolacije in o stanju materialov v notranjosti aktivnega dela transformatorja. Medtem, ko je dielektrična trdnost celulozne izolacije bistveno večja in praktično neodvisna od zunanjih dejavnikov, je dielektrična trdnost transformatorskega olja odvisna od več faktorjev (temperatura, vlaga, tlak in nečistoče v olju). Novo osušeno transformatorsko olje lahko dosega električno prebojno trdnosti tudi 30 kV/mm, pri kritično ostarelih oljih pa ta vrednost pade pod 10 kV/mm.

Mineralno izolacijsko olje se kot elektro-izolacijsko in hladilno sredstvo v električnih strojih pod imenom transformatorsko olje uporablja že cca. 100 let. Izdelano je z destilacijo izbranih frakcij nafte do primerne viskoznosti in nato temeljito očiščeno vseh nestabilnih aromatskih komponent in škodljivih polarnih molekul ter ionov. Ker je olje v kontaktu z notranjimi aktivnimi deli transformatorja, (jedro, navitja) je glede na zahteve mednarodnih standardov lahko izpostavljeno relativno visokim delovnim temperaturam (dolgotrajno maksimalno 100°C, kratkotrajno 120°C-160°C) . Pri takih temperaturah mora dolgotrajno

ohranjati dobre kemijske, fizikalne in električne lastnosti. Posebno pozornost pri transformatorskem olju je potrebno posvetiti predvsem preprečitvi vlage v olje. Za ta namen se na transformatorju uporablja posebna sušilna naprava s silikagelnim granulatom, kateremu je potrebno sprotno preverjati stanje oziroma barvo, iz katere je razvidna prisotnost zračne vlage v olju.

3. NASTANEK KVARNIH GORLJIVIH PLINOV V TRANSFORMATORSKEM OLJU

Pri opravljanju izolacijske funkcije je transformatorsko olje podvrženo električnemu polju visoke jakosti, povečani temperaturi, vlagi in kisiku ter železovim in bakrovim ionom. Okvare, ki v transformatorju nastanejo imajo lahko različne vzroke. Povečini okvare nastajajo zaradi vdora električnih prenapetosti iz omrežja, zaradi pregrevanja na slabih spojih navitij, pregrevanja zaradi napak v magnetnem jedru ob morebitnih med ovojnih stikih. Lahko tudi zaradi okvar na selektorju regulacijskega stikala ali kot posledica slabe ali površne izdelave aktivnih delov transformatorja, kot so navitja, železno jedro, spoji, regulacijsko stikalo in podobno. Kot glavne dejavnike za nastanek gorljivih plinov lahko štejemo, termično degradacijo izolacije zaradi pregrevanja, parcialna praznjenja na oslabelih lokalnih točkah izolacije in električni oblok, kot posledica preboja med aktivnimi deli v transformatorju pri katerih se pojavljajo velike potencialne razlike. Ti pojavi v olju sprožajo kemični razkroj izpostavljenih materialov izolacijskega sistema papir-olje, ter posledično nastanek kvarnih plinov v transformatorskem olju. Kvarni gorljivi plini se v primeru intenzivnih okvar (npr. kratkostični oblok) pojavljajo v obliki plinskih mehurčkov, ki se dvigujejo proti vrhu transformatorskega kotla in se zbirajo v zaščitnem plinskem (Buchholz) releju. V primeru kratkotrajnih ali počasi razvijajočih se okvar pa se kvarni plini raztapljajo v olju brez izločanja mehurčkov.

Mineralna izolacijska olja, ki so v večini najpogosteje uporabljeni tip olj v energetskih transformatorjih, so sestavljena iz mešanice ogljiko-vodikovih molekul ($-CH_3$, $-CH_2$ in $-CH$) med seboj povezanih z ogljikovimi vezmi. [1] Ob električnih in toplotnih preobremenitvah prihaja do cepitve teh vezi, ob tem nastajajo manjši nestabilni radikali in prosti ioni, ki se rekombinirajo v nove molekule ogljiko-vodikov (vodik H_2, metan CH_4, etan C_2H_6, acetilen C_2H_2, etilen C_2H_4), kot tudi v trdne ogljikove delce in v voske iz polimernih ogljikovodikov.
Pri nizko-energijskih okvarah (ca 340kJ/mol), kot so npr. delna (koronarna) praznjenja, primarno prihaja do cepitve šibkih C-H vezi, ionizacije, rekombinacije in izločanja vodika (H_2) v olju. Z naraščanjem energije okvare se začenja pirolitično cepljenje in rekombinacija enojnih ogljikovih vezi (C-C) nad 600 kJ/mol, razpad dvojnih vezi (C=C) nad 720 kJ/mol in razpad trojnih vezi (C≡C) nad 960 kJ/mol. Višje so temperature okvare, večji je delež rekombiniranih ogljikovodikov z dvojnimi oz. trojnimi vezmi. Povišane koncentracije metana in etana so značilne za nizko-temperaturno pregrevanja jedra ali papirne izolacije navitij. Nastajanje plina etilena se začne pri ca. 500°C, acetilena pa med 800°C do 1200°C. Hitrost nastajanja plinov je eksponentno odvisna od temperature na mestu okvare in se podvaja na vsakih 10°C. Količino nastalih plinov gorljivih plinov pa poleg temperature in časa trajanja okvare, bistveno pogojuje tudi obseg (velikost) okvare. [2]

Gorljivi plini tako nastajajo zaradi posledic prevelikega električnega polja, lokalnih pregrevanj zaradi vrtinčnih tokov v železnem magnetnem jedru ali ostalih železnih elementov pod vplivom izmeničnega magnetnega polja. Lahko tudi zaradi prebojev napetosti pri medovojnih stikih, lahko zaradi slabih spojev navitij in priključkov ter spojih na selektorju regulacijskega stikala. Zlasti pri regulacijskih transformatorjih lahko ostane dolgo prikrita napaka, ker se plini formirajo le pri določeni stopnji selektorja v kateri je slabo pričvrščen kontaktni sistem. [3]

Kvarni gorljivi plini v olju nastajajo tudi kot posledica pirolitične razgradnje celulozne izolacije že pri bistveno nižjih temperaturah (nad 105 °C), pri čemer predstavljata primarna razkrojna produkta ogljikov monoksid (CO) in ogljikov dioksid (CO_2). Plini se v energetskih transformatorjih lahko pojavijo tudi zaradi rjavenja ali drugih kemičnih reakcij transformatorskega jedra, nezaščitenih površin transformatorskega kotla ali uporabe zaščitnih barv v kontaktu z oljem.

Vodik se tako lahko sprošča zaradi reakcije vode v olju s posebnimi premazi za kovinske površine, ali s katalitsko reakcijo nekaterih vrst nerjavečega jekla z oljem, še posebej pri visokih temperaturah in oljih z visoko vsebnostjo raztopljenega kisika. Vodik se lahko izloča tudi iz nerjavečega jekla, ki se absorbira tekom proizvodnega procesa ter se počasi sprošča v olje med obratovanjem. [4]

4. DELOVANJE PLINSKEGA RELEJA

Plini, ki nastajajo ob okvarah v relativno kratkem času dospejo do plinskega (Buchholz) releja. Osnovni princip delovanja je, da se v zbirni posodi plinskega releja nabere dovolj velika količina plina, plovec spremeni položaj in povzroči signalizacijo ter v nadaljevanju izklop transformatorja. Plinski rele v bistvu deluje le na veličini volumna izpodrinjene tekočine, torej lahko tudi na volumsko količino zraka. Ravno iz tega razloga v tem članku opisujemo prednost detekcije gorljivih plinov. Glede na značaj okvare se plini lahko formirajo različno dolgo glede na obremenitev oz. tok čez navitje transformatorja. Sorazmerno temu se formira tudi volumen gorljivega plina. Plinski rele velikega energetskega transformatorja zazna plin šele, ko se v zbiralniku nabere 0,5 dm^3 plina ali zraka. Izklop po zaščiti pa se izvede pri volumnu 1,6 dm^3. To je za okvare majhnega značaja relativno velika količina. Senzor za detekcijo gorljivih plinov reagira že pri izredno majhnih količinah 0,01 dm^3. Poleg tega je pri detekciji gorljivega plina bistvena prednost, da takoj vemo ali gre za gorljiv plin ali le za zračni mehur. Ob tako pridobljeni zanesljivi informaciji ne izklopimo transformatorja brez potrebe za izvedbo standardnega preizkusa značaja plina v plinskem releju z odprtim plamenom. Ob manjših količinah plinov je tovrsten preizkus namreč zelo nezanesljiv. Pri samem testu z odprtim plamenom lahko plin izgubimo in rezultat preizkusa posledično ni uspešno izveden. V takšnih primerih se uporaba senzorja gorljivih plinov izkaže kot izrazito prednostna, saj lahko že pri ***50 krat*** manjših volumnih formiranih plinov uspešno in zanesljivo zaznamo gorljiv plin.

Dokaj pogost vzrok za nenaden porast pojav plinov v plinskem releju predstavlja vdor okoliškega zraka na tesnilnem sistemu transformatorja. V energetskih transformatorjih se ob zaustavitvah in posledično hitrem ohlajevanju lahko vsesa zrak v notranjost transformatorja

zaradi nepopolnega tesnjenja dilatacijskega sistema. Nekaj zraka v transformatorju lahko ostane tudi po izvajanju večjih vzdrževalnih del, ko določene dele transformatorja ni mogoče uspešno odzračiti v času po zaključku montažnih del (zračni žepi). Tovrstne zračne žepe v bistvu odzrači šele prisiljen pretok olja s pomočjo delujoče olje črpalke. **V teh primerih klasični plinski rele zazna in signalizira neustrezno stanje šele, ko se zrak dvigne iz kotla v rele in je transformator v normalnem obratovanju lahko že več ur. Pri takšnem stanju signalizacije se ne ve zaradi česar je prišlo do opozorila in lahko le ugibamo ali gre za zračni mehurček ali gorljiv plin. Nadgrajeni plinski rele s senzorjem gorljivih plinov v takšnem primeru takoj zazna značaj plina in izloči dvom o okvari. V tem primeru plinski rele lahko enostavno odzračimo brez potrebnega izklopa transformatorja. Zaradi tega je pravilna in pravočasna detekcija gorljivih plinov v transformatorskem olju izredno pomembna za neprekinjeno, varno in zanesljivo obratovanje**.

5. TRANSFORMATORJI V ELEKTROENERGETSKEM SISTEMU SLOVENIJE

V Slovenskem elektroenergetskem omrežju je v prenosnem in distribucijskem omrežju vgrajenih skupno 19861 transformatorjev, kot je razvidno iz tabele(1) in sicer:

Tabela 1: Število transformatorjev glede na moč in napetostni nivo v ELES in SODO

Navidezna moč TR	Napetostna prestava	Število transformatorjev
600 MVA	TR 400/400 kV	2
400 MVA	TR 400/220 kV	3
300 MVA	TR 400/110 kV	7
150 MVA	TR 220/110 kV	10
10-50 MVA	TR 110/SN	199
1-10 MVA	TR SN/SN	80
0,4-1 MVA	TR SN/NN	6529
0,05-0,4 MVA	TR SN/NN	13032

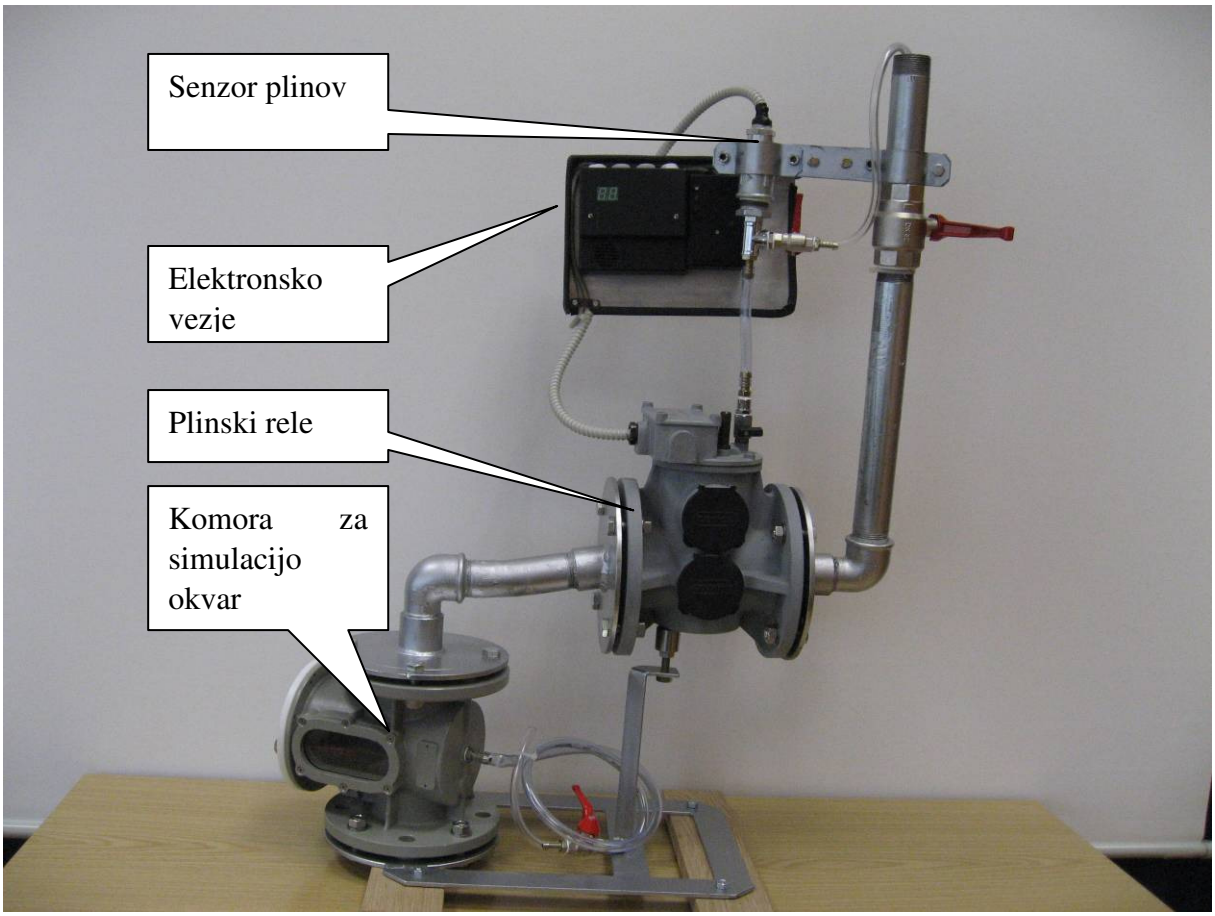
Poleg v tabeli navedenih so transformatorji in blok transformatorji vgrajeni tudi v elektrarnah in v industrijskih kompleksih internega značaja, tako da se ocenjuje, da v Sloveniji obratuje cca. 22000 transformatorjev. Vsi transformatorji nad 400 kVA imajo praviloma vgrajene plinske releje vezane na ustrezno signalizacijo in z izvedbo izklopa po zaščiti. Skupno je teh transformatorjev 6830. Transformatorji manjših moči nimajo vgrajenega plinskega releja in so varovani kar z varovalkami ali posebnimi bimetalnimi izklopnimi elementi. Takšnih transformatorjev obratuje v Sloveniji več kot 13000. Na vseh teh napravah je možna nadgradnja plinskih relejev, ali enostavna vgradnja senzorjev gorljivih plinov na sistem odzračevanja transformatorja

6. OPIS SIMULACIJSKE TESTNE NAPRAVE IN DETEKCIJE GORLJIVIH PLINOV

Za potrebe testiranja senzorja detekcije gorljivih plinov smo izdelali posebno simulacijsko napravo, ki ponazarja realne razmere v energetskem transformatorju in omogoča primerjalno časovno analizo hitrosti delovanja plinskega releja naproti senzorju za detekcijo gorljivih plinov. S testno napravo je možno v posebni komori povzročati razmere podobne realnim okvaram, ki običajno nastajajo v transformatorju in sicer:

- simulacija pregrevanja lokalnih točk v železnem jedru,
- simulacija pregrevanja slabih tokovnih spojev,
- simulacija delnih praznjenj z znižano visoko napetostjo,
- preboj in električni oblok v olju.

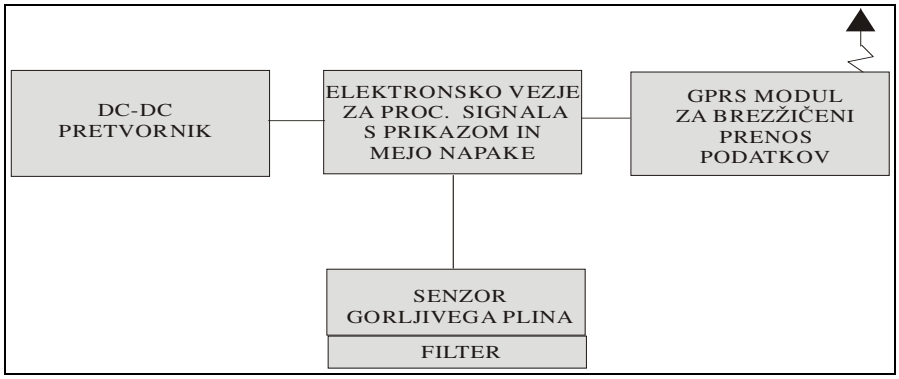
Iz posebnega simulacijskega prostora (komore), ki bi v realnosti predstavljal transformator, povzročeni kvarni gorljivi plini po ocevju po določenem času prispejo v plinski rele. Že ob zelo mali količini gorljivega plina (0,01 dm^3) poseben senzor gorljivih plinov detektira in razpozna ali gre za zrak ali za gorljiv plin. Elektronsko vezje signal iz senzorja s pomočjo procesorja ustrezno obdela in ga lahko prikaže ali prenaša na načine, kot je opisano v nadaljevanju.



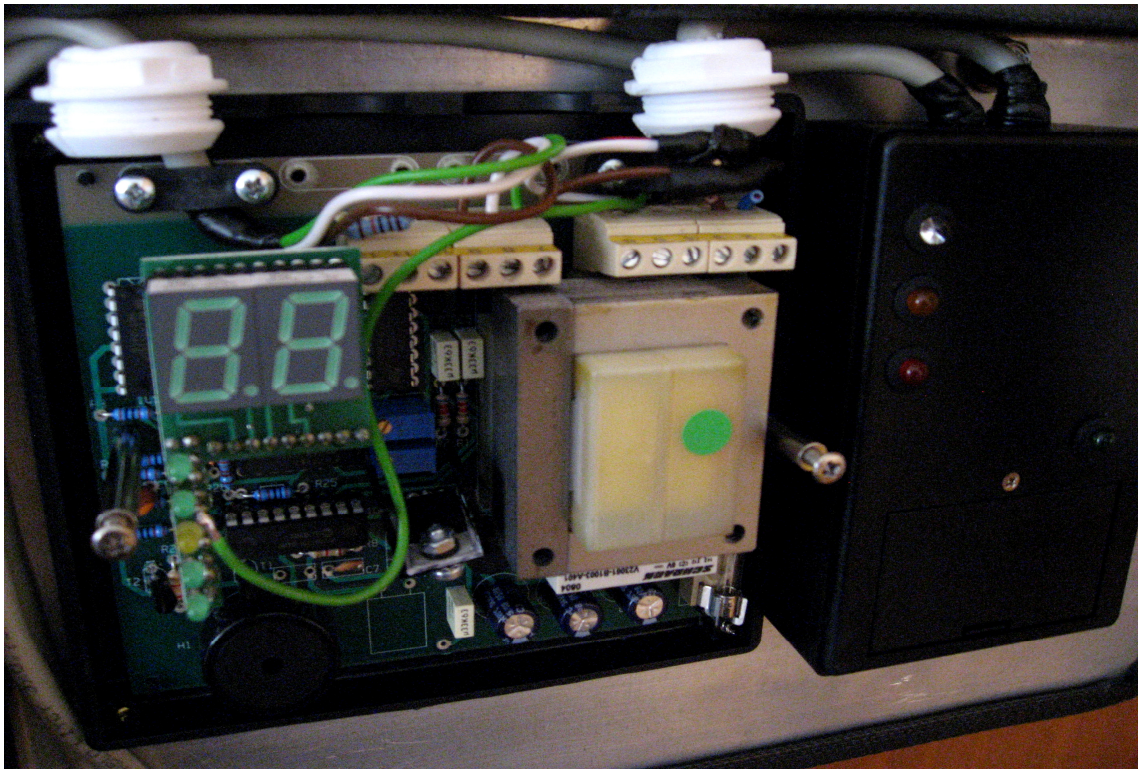
Na sliki (1) je prikazana celotna simulacijska naprava. Detektor gorljivih plinov je naprava za ugotavljanje prisotnosti gorljivih plinov v zraku. Osnovni element za izgradnjo detektorja gorljivih plinov je senzorski element. Senzorji plina so elementi ali naprave, ki pretvorijo prisotnost plina v enostavno merljivo fizikalno veličino. Signal senzorske narave, je potrebno ustrezno ojačati in predelati v obliko primerno za registracijo, prikaz in prenos podatkov. Pri simulacijski napravi smo uporabili senzorski element, ki deluje na principu izgorevanja gorljivega plina na merilnem elementu. Plin iz plinskega releja na najvišji točki prispe v izgorevalno komoro, kjer na senzorskem elementu povzroči spremembo upornosti. Hitrost in veličino spremembe merjene veličine vodimo na elektronsko vezje, ki s pomočjo A/D pretvorbe obdela signal.

S pomočjo programiranega elektronskega vezja lahko določamo meje detekcije glede na % vsebnosti gorljivega plina v zraku. V transformatorju se ob okvarah tvorijo plini, ki so lažji od zraka, zato gorljivi plini relativno hitro prispejo do senzorja, ki v nadaljevanju s pomočjo elektronskega vezja izvede ustrezno alarmiranje lokalno ali s pomočjo GPRS prenosa v nadrejene nadzorne centre. Meritev ciljnih plinov temelji na senzorju gorljivega plina z ustreznim filtrom glede na zahtevano okolje in delovanje. Izbran senzor je polprevodniški tip senzorja. Pri izbiri smo upoštevali eksperimentalne preizkuse in optimalne rešitve. Prisotnost plina se odraža kot sprememba električne prevodnosti merilnega elementa. Električna prevodnost je določena s pomočjo koncentracije prostih elektronov (tip n) ali vrzeli (tip p). Ko je senzor izpostavljen prisotnosti gorljivega plina, površina absorbira molekule plina in povzroči oksidacijo. To zniža potencial in omogoči elektronom da se lažje gibljejo, kar pomeni povečanje prevodnosti. Polprevodniški tip senzorjev je primeren za merjenje vseh koncentracij gorljivih plinov. [5]

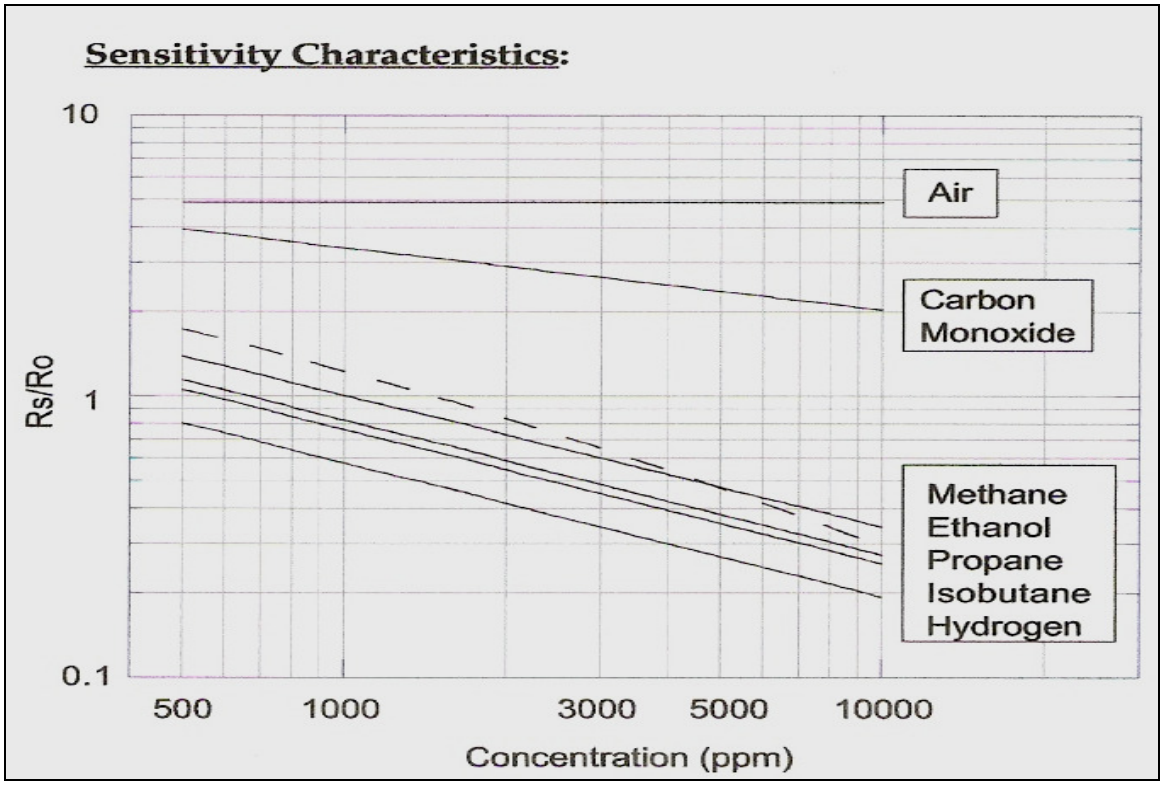
Elektronsko vezje procesira signal senzorja ki vključuje linearizacijo signala in kompenzacijo motilnih vplivov ter s tem zagotavlja zanesljivo delovanje. Elektronsko vezje omogoča tudi detekcijo napake z izklopom in prikazom vrednosti meritve. Opisani sistem detekcije gorljivih plinov omogoča hitro detekcijo napake tranformatorja. Točnost poleg senzorskega elementa zagotavlja filter, procesiranje signala in ustrezna kalibracija. Ker naprava detektira gorljive pline mora biti izdelana v protieksplozijski zaščiti, da ne bi sama povzročila eksplozije. Zato je pri konceptu izgradnje sistema uporabljen neprodirni okrov ***Exd*** - (deli električnih naprav, ki lahko povzročijo vžig, so zaprti v neprodirno tlačno ohišje, izdelano tako, da brez poškodbe zdrži pritiske eksplozije od znotraj ter prepreči prenos eksplozije iz notranjosti naprave v eksplozivno atmosfero zunaj njenega ohišja).



Slika 2: Blok shema delovanja detekcije gorljivih



Slika 3: Elektronsko vezje za detekcijo gorljivih plinov



Graf 1: Karakteristika spreminjanja upornosti senzorja glede na koncentracijo plinov.

Graf (1) prikazuje karakteristiko uporabljenega senzorskega elementa in spreminjanje razmerja upornosti (R_S/R_0), glede na koncentracijo gorljivih plinov. Pri tem pomeni (R_S) upornost senzorja glede na koncentracijo gorljivih plinov, (R_0) pa pomeni referenčno upornost senzorja pri 1000 ppm plina metana.

Izvedena testiranja so pokazala izredno dobre rezultate, saj je detektor zaznal gorljiv plin takoj, ko je mehurček gorljivih plinov dosegel komoro senzorja. Za simulacijo pregrevanja bakrenega navitja in dela železnega jedra smo uporabili tokovni generator izmeničnega toka in v simulacijsko komoro vrinili 160 A izmeničnega toka, tako v primeru simulacije okvare spoja bakrenega navitja, kot tudi okvare železnega jedra. Ob tem se je ob pregrevanju elementov hitro formiralo dovolj plina, da je senzor zaznal gorljiv plin. Pri električnem obloku v olju je bil ta pojav še bistveno bolj izrazit in je bilo za detekcijo gorljivega plina dovolj že nekaj sekund po izvedenem obloku v olju. Oblok smo izvedli z visokonapetostnim transformatorjem z napetostjo 15 kV.

V realnosti obstaja razlika med velikim energetskim transformatorjem in simulacijsko komoro v času dospetja gorljivega plina do plinskega releja. Na velikih enotah se plinski mehur dviga dlje časa in je odzivni čas od nastanka okvare do detekcije plina daljši. Vsekakor je prednost informacije o prisotnosti gorljivega plinu velika, saj v takem primeru že takoj z gotovostjo vemo, da stanje transformatorja s stališča zanesljivosti obratovanja ni ustrezno. Glede na dejstvo, da senzor uspešno razpozna že male količine gorljivih plinov, ki so 50 krat manjše od količin, pri katerih bi plinski rele šele signaliziral prisotnost plina ima dogradnja senzorja gorljivih plinov tudi veliko praktično uporabno vrednost.

Elektronsko vezje lahko prilagajamo potrebam in ceni detekcijskega kompleta. Cena senzorja, vključno z elektronskim vezjem se giblje med 250-1500 EUR in dodatno še strošek montaže naprave. Posebnega vzdrževanja senzorja ni potrebno izvajati, priporočljivo pa je senzor ob reviziji transformatorja enostavno testirati z enim izmed od gorljivih plinov.

7. EKONOMSKA UPRAVIČENOST DOGRADNJE SENZORJA NA TRANSFORMATOR TER IZRAČUN STROŠKOV ZARADI OKVARE TRANSFORMATORJA S POMOČJO IZRAČUNA ZANESLJIVOSTI

V tem poglavju obravnavamo zanesljivost izpada energetskega transformatorja zaradi delovanja plinskega releja transformatorja. Z dolgoletnim spremljanjem statistike okvar in iz tovrstno pridobljenih izkušenj vemo, da transformator ne glede na navidezno moč S [kVA] izpade cca. v treh letih za uro in pol. Iz stališča zanesljivosti podatek podamo v obliki nerazpoložljivosti naprave za normalno obratovanje. Nerazpoložljivost transformatorja zaradi okvare je Q = 0,5 [h/leto]. Zanesljivostni podatek velja za tiste transformatorje, ki imajo za zaščito pred plini vgrajen plinski rele. Želja novega pristopa k zaščiti transformatorjev je podati in primerjati stroške nedobavljene električne energije, glede na navidezno moč in podano nerazpoložljivost transformatorja kot dela omrežja. S pomočjo enačbe (1) lahko izračunamo pričakovano nedobavljeno električno energijo:

$$W=S\times f_{\mathrm{p}}\times Q \tag{1}$$

Pri čemer velja:
f_{p} – faktor moč, ki znaša 0,75.

Na podlagi enačbe (1), lahko izračunamo strošek nedobavljene energije, enačba (2):

$$C_{\mathrm{ned}}=W\times C_{\mathrm{kWh}} \tag{2}$$

Ceno nedobavljene električne energije C_{kWh} smo povzeli iz razmerja vrednosti bruto domačega proizvoda (BDP) Slovenije za leto 2011 in števila ur brez dobave v enem letu. Zbrane in izračunane podatke so podane v tabeli (2):

Tabela 2: Zanesljivostni podatki in stroški nedobavljene električne energije

S [kVA]	število naprav	Q [h/leto]	W [kVA/h]	C_{ned} [€]
400	2.226	0,5	150	450
500	5	0,5	187,5	563
630	3.090	0,5	236,25	709
800	4	0,5	300	900
1000	1.273	0,5	375	1.125
1250	62	0,5	468,75	1.406
1600	125	0,5	600	1.800
2000	5	0,5	750	2.250

2500	6	0,5	937,5	2.813
3150	1	0,5	1181,25	3.544
20000	6	0,5	7500	375
150000	10	0,5	56250	2.813
300000	6	0,5	112500	5.625
400000	3	0,5	150000	7.500
600000	2	0,5	225000	11.250

V tabeli (2) v prvem stolpcu razvrstimo energetske transformatorje glede na velikost moči. Drugi stolpec navaja njihovo število. V tretjem se nahaja nerazpoložljivost zaradi okvare.

V četrtem stolpcu so podani rezultati iz enačbe (1), kjer se izračunava pričakovana nedobavljena električna energija. V zadnjem stolpcu se navaja strošek nedobavljene energije zaradi okvare transformatorja. Cena 1 kVAh električne energije za izpad transformatorja do moči 20 MVA znaša 3 € (podatek pridobljen iz BDP/8760 ur). Za transformatorje večjih moči od 20 MVA pa znaša cena za 1 kVAh 0,05 € (cca. tržna cena električne energije). Slednji transformatorji moči nad 20 MVA, so v večini vpeti v zazankano omrežje, zato njihov izpad zaradi okvare ne predstavlja večjega stroška. Na podlagi pridobljeni stroškov glede na moč transformatorja lahko ocenimo ekonomsko upravičenost pri dogradnji zaščite z detekcijo gorljivih plinov. Glede na ceno detektorja gorljivih plinov v primerjavi z vrednostmi iz tabele (2) je vsekakor ekonomsko upravičena dogradnja transformatorjev s tovrstnimi senzorskimi detektorji. Sploh pri večjih transformatorskih enotah je pravilno diagnosticiranje izrednega pomena, tako s stališča obratovalne zanesljivosti, kot tudi s stališča planiranja vzdrževalnih del na energetskih transformatorjih.

8. ZAKLJUČEK

Glede na veliko število energetskih transformatorjev, bi bilo zlasti na večjih transformatorskih enotah nad 0,4 MVA smiselno dograditi detektor gorljivih plinov. Na večjih enotah je nadgradnja plinskega releja enostavna in ne zahteva dodatnih posegov glede prenosa podatkov v nadrejene centre, saj so ožičenja v tem primeru že izvedena v okviru ožičenja obstoječega plinskega releja. Večjih transformatorskih enot je v Sloveniji cca. 6900. Na preostalih manjših enotah je smiselno detekcije gorljivega plina z daljinskim prenosom vgraditi na rizično zasnovani mreži smiselno in le po potrebi. Predvsem na večjih transformatorskih enotah je glede na opisane težave s plinskimi releji po večjih revizijah s stališča preverjanja plinov v komori releja, detekcija gorljivih plinov zelo priročna in uporabna metoda. Ob hitri in učinkoviti informaciji ni potrebno transformatorja ponovno izklapljati in izvajati dodatnih testiranj. Tako je zagotovljena večja zanesljivost in manjša stopnja tveganja za okvare energetskih transformatorjev.

9. LITERATURA

[1] IEC Publ. 60296, Third edition, November 2003, Fluids for electrotechnical applications-Unused mineral insulating oils for transformers and switchgear.
[2] Referat EIMV št.1832 "Transformatorska olja in njihova uporaba", Februar 2007.
[3] Cigre ŠK D1-1, Zagotovitev kakovosti transformatorskega olja v novih VN transformatorjih, Čatež 2007.
[4] Cigre ŠK A2-5, Metoda za dimenzioniranje izolacije transformatorja, Čatež 2007.
[5] TGS, - for the detection of Combustible gases REV/9/02.

NASLOV AVTORJEV

red. prof. dr. Jože Pihler,
red. prof. dr. Jože Voršič

Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko
Smetanova ulica 17, SI-2000 Maribor, Slovenija

mag. Robert Maruša,
mag. Lovro Belak,
mag. Rado Ferlič.

Elektro-Slovenija, d.o.o.,
Hajdrihova 2, SI-1000 Ljubljana, Slovenija,

Tim Gradnik,
Elektro-inštitut Milan Vidmar (EIMV),
Hajdrihova 2, SI-1000 Ljubljana, Slovenija,

mag. Blaž Zupan,
Strokovni sodelavec