

REFERAT - VI

Viktor Martinčič univ. dipl. inž.el.

ETI Elektroelement d.d., Izlake
Viktor.martincic@eti.si

Mag. Darko Koritnik, univ.dipl.inž.el.

Infrastrukturni center za energetske meritve- tehnološki center
Darko.koritnik@uni-mb.si

Prof. dr. Jože Pihler, univ.dipl.inž.el.

Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Laboratorij za energetiko
Joze.pihler@uni-mb.si

Danijel Glušič, univ.dipl.inž.el.

Infrastrukturni center za energetske meritve- tehnološki center
Daniel.glusic@uni-mb.si

UPORABA NOVE GENERACIJE VISOKONAPETOSTNIH VAROVALK ZA ZAŠČITO TRANSFORMATORJEV

POVZETEK:

Uporaba taljivih varovalk je najpogostejša zaščita distribucijskih transformatorjev pred posledicami povečanih vrednosti primarnega toka in kratkega stika. Tak način zaščite je enostaven, zanesljiv in cenovno ugoden, vendar se pojavijo določeni problemi in omejitve. V tem prispevku so razložene fizikalne zakonitosti varovanja s taljivimi varovalkami in praktične rešitve. Prav tako so prikazani najnovejši dosežki na tem področju in trendi razvoja.

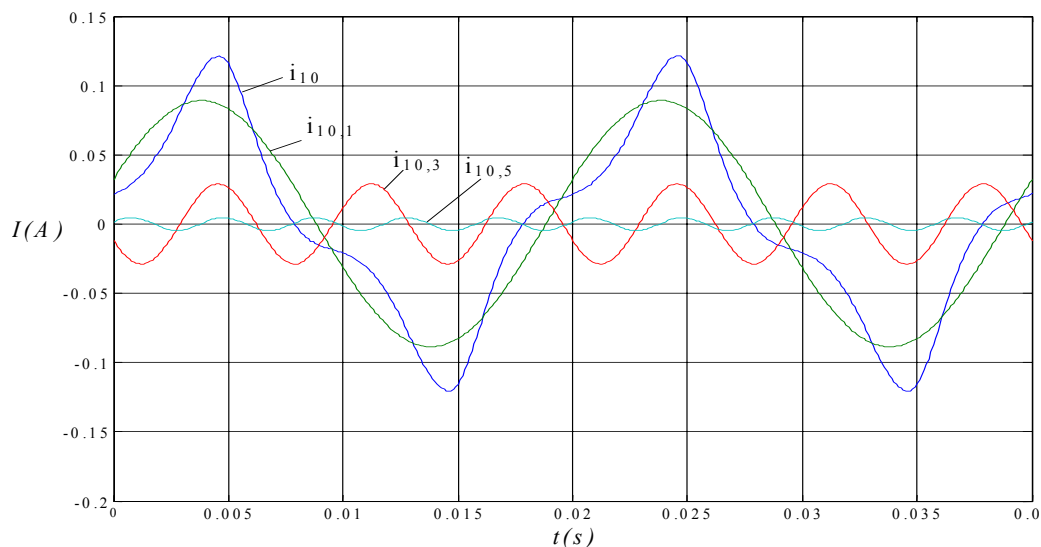
1. UVOD

Uporaba taljivih varovalk je najpogostejša zaščita distribucijskih transformatorjev pred posledicami povečanih vrednosti primarnega toka in kratkega stika. Tak način zaščite je enostaven, zanesljiv in cenovno ugoden, vendar se pojavijo določeni problemi in omejitve. V tem prispevku so razložene fizikalne zakonitosti varovanja s taljivimi varovalkami in praktične rešitve. Prav tako so prikazani najnovejši dosežki na tem področju in trendi razvoja.

2. OBRATOVALNA STANJA TRANSFORMATORJEV

2.1 Prosti tek transformatorja

O neobremenjenem transformatorju ali tudi o transformatorju v prostem teku govorimo takrat, ko je na primarno navitje pritisnjena napetost, sekundarni tokokrog pa ni sklenjen. Kljub temu, da je sekundarni tok nič teče skozi primar nek tok, I_{10} , ki ga imenujemo tok prostega teka ali magnetilni tok. Transformator ga potrebuje za vzbujanje magnetnega polja v jedru, ki inducira napetost na sekundarni strani transformatorja U_2 . Za induciranje sinusne napetosti na sekundarju je potreben sinusni fluks, ki pa zaradi oblike histerezne zanke potrebuje ne sinusni magnetilni tok (slika **Napaka! Neveljavna povezava.**). Sestavljen je iz lihih višje harmonskih komponent ($I_{10,1}$ – osnovni harmonik – 50 Hz, $I_{10,3}$ – tretji harmonik – 150 Hz, $I_{10,5}$ – peti harmonik – 250 Hz...). Njegova efektivna vrednost pa je 4% - 8% nazivnega toka.



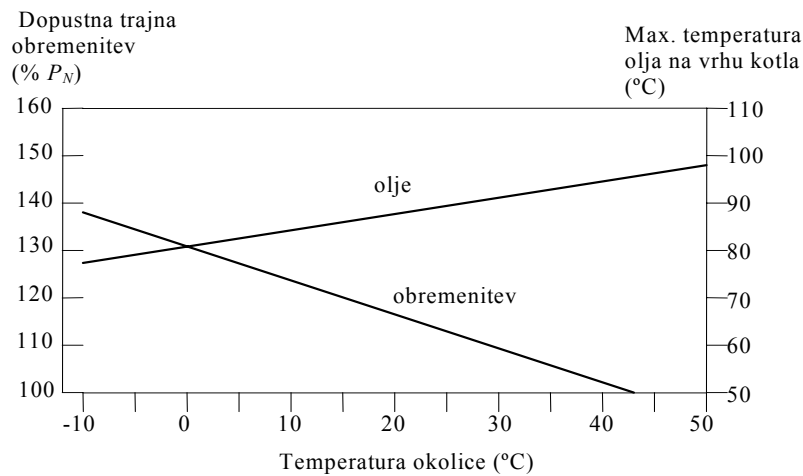
Slika 1: Oblika primarnega toka prostega teka in najpomembnejših višjih harmonskih komponent

2.2 Nazivna obremenitev

Pri nazivni obremenitvi transformatorja se le ta segreje do maksimalne dovoljene nadtemperature

$\Delta\theta = \theta - \theta_0$, ki je podana glede na dopustno nadtemperaturo izolacije. Standard IEC 60354 [9] določa maksimalne dopustne temperature za oljne transformatorje, pri katerih še lahko govorimo o nazivni obremenitvi. Temperatura najbolj vroče točke kovinskih delov v stiku z izolacijo je lahko 140 °C in najvišja temperatura olja je lahko 105 °C.

Transformator oddaja temperaturo v okolico s konvekcijo in sevanjem. V primeru, da je temperatura okolice nižja od predvidene za določeno nadtemperaturo, lahko transformatorju povečamo dopustno trajno obremenitev glede na temperaturo okolice.



Slika 2: Korekcija dopustne obremenitve in najvišje dopustne temperature olja na vrhu kotla, v odvisnosti od zunanje temperature

Kot nazivno obremenitev smatramo tudi spreminjajočo obremenitev okoli nazivne obremenitve, vendar pri tem ne sme temperatura narasti preko dopustnih vrednosti in tok ne sme nikoli preseči 150 % nazivnega toka.

Nazivna obremenitev predstavlja normalno staranje transformatorja, predvsem izolacije.

2.3 Preobremenitev transformatorja

Preobremenitev ni normalno obratovalno stanje transformatorja. V praksi se ga izogibamo, saj s tem bistveno vplivamo na življenjsko dobo transformatorja. V določenih situacijah pa je preobremenitev transformatorja nujna, saj bi izpad oskrbe z električno energijo povzročil veliko gospodarsko škodo ali celo ogrozil življenja.

Standard IEC 60354 [9], glede na čas trajanja in stopnjo preobremenitve, loči dve vrsti preobremenitev, ter podaja dopustne temperature posameznih delov:

2.3.1 Dolgotrajna preobremenitev

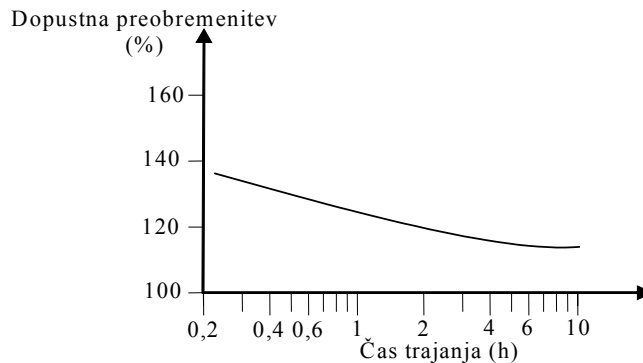
Dolgotrajna preobremenitev lahko traja od pol ure pa tudi do celega dne. Pri tej obremenitvi lahko naraste temperatura najbolj vroče kovinske točke na 150 °C in temperatura olja na 115 °C. Tok ne sme nikoli narasti nad 1,8 kratnik nazivnega toka. Te obremenitve kratkotrajno ne ogrožajo transformatorja, vendar močno pospešijo staranje izolacije in s tem zmanjšujejo življenjsko dobo.

2.3.2 Kratkotrajna preobremenitev

Kratkotrajna preobremenitev je najbolj ekstremen način obratovanja, saj lahko tok naraste tudi na dvakratnik nazivnega toka, temperature pa narastejo tudi preko 160 °C. Pri teh temperaturah se v olju že začnejo sproščati plinski mehurčki, ki bistveno vplivajo na izolacijske sposobnosti olja. Kratkotrajne preobremenitve lahko povzročijo tudi preboje in s tem uničenje transformatorja, zato so opravičljive le, če se s tem prepreči večja gospodarska škoda ali rešuje življenja.

2.3.3 Dopustne preobremenitve

Če obremenimo transformator z močjo, ki je večja od nazivne moči, tedaj transformator ne bo mogel obratovati trajno, ampak samo tako dolo dokler se ne segreje do dovoljene temperature. Na sliki 3 je prikazan primer dopustnega trajanja preobremenitve za tipični distribucijski transformator. Nazivna moč S_n je lahko korigirana glede na temperaturo okolice, kot je opisano v poglavju 2.2.

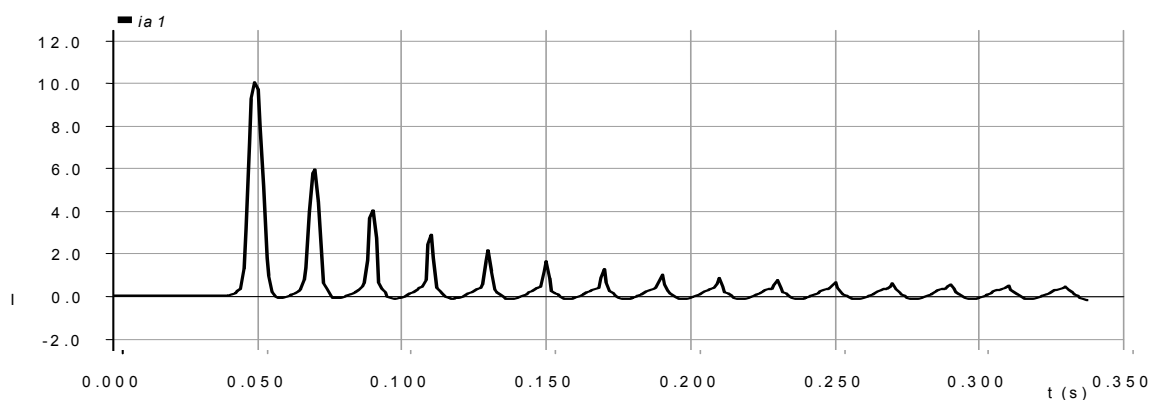


Slika 3: Dopustno trajanje preobremenitve za tipični distribucijski transformator.

Krivulja dopustnega trajanja preobremenitve je praktično neodvisna od temperature okolice, zato jo lahko uporabljamo v celotnem območju od $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Vklopni tok

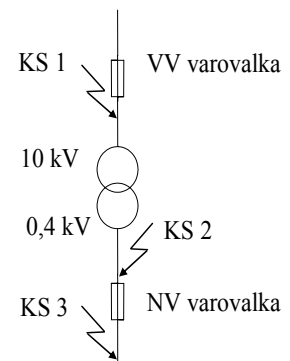
Ko pritisnemo na transformator, ki je brez bremena, primarno napetost U_1 , steče skozi primarno navitje tok praznega teka. V primeru, da transformator vklopimo v trenutku, ko je napetost na vrednosti 0 se pojavi izrazit prehodni pojav pri katerem je lahko amplituda toka tudi 10 krat večja od amplitude nazivnega toka. Tok nato eksponentno pada in se dokončno izniha v nekaj deset periodah. Pri tem se v transformatorju ne sprosti dovolj energije, da bi lahko ogrozili navitje ali izolacijo.



Slika 4: Časovni potek vklopnega toka

2.4 Kratki stik

Kratki stik je okvara pri kateri steče največji možen tok, saj ga omejujejo le upornosti elementov v napajalnem omrežju. Kratkostični tokovi dosegajo vrednosti, ki lahko termično in mehansko poškodujejo opremo že v nekaj sekundah, zato mora biti oprema primerno dimenzionirana in zaščita ustrezno izbrana. Pri zaščiti transformatorjev moramo upoštevati tri možne točke kratkega stika.



Slika 5: Možne točke kratkega stika

2.4.1 Kratek stik na primarni strani transformatorja

Če pa pride do kratkega stika med VV varovalkami in transformatorjem (slika 5, KS 1), ta tok omejuje samo impedanca omrežja pred njim. Kratkostični tok lahko izračunamo s pomočjo kratkostične moči omrežja.

$$I''_{k,KS1} = \frac{1,1 \cdot S''_k}{\sqrt{3} \cdot U_n} \quad (1)$$

Kratkostična moč omrežja je odvisna od konfiguracije omrežja in obratovalnega stanja, v praksi znašajo vrednosti za kratkostične toke na 10 kV omrežju med 3 in 10 kA.

Ti toki kratkega stika ne tečejo skozi transformator in ga seveda ne ogrožajo.

2.4.2 Kratki stik na sekundarnih strani transformatorja

KS 2 na sliki 5 prikazuje točko kratkega stika, med sekundarjem transformatorja in NV varovalkami. V tem primeru omejuje tok kratkega stika vsota impedanc visokonapetostnega omrežja in transformatorja. Praviloma je upornost transformatorja vsaj 10 ali večkrat večja od upornosti omrežja, zato lahko upoštevamo le upornost transformatorja in izračunamo tok kratkega stika.

$$I''_{k,KS2} = \frac{100 \cdot S_{rT}}{U_{rT_{NN}} \cdot u_k} \quad (2)$$

Ta tok teče skozi transformator in ga s tem tudi ogroža, zato mora primarna zaščita pravočasno prekiniti tokokrog.

2.4.3 Kratki stik na sekundarnem omrežju

Parametri kratkostičnih tokov pri okvari na sekundarnem omrežju (slika 5, KS 3) so praktično enaki kot na sekundarni strani transformatorja. Razen, če je kratki stik daleč stran od transformatorja, v tem primeru, se kratkostični tokovi še dodatno zmanjšajo zaradi impedanc nizkonapetostnega omrežja.

3. DELOVANJE IN KARAKTERISTIKE NOVE GENERACIJE VISOKONAPETOSTNIH VAROVALK

3.1 Splošen opis:

Po definiciji so visokonapetostne varovalke (v nadaljevanju VV) namenjene za uporabo v izmeničnih sistemih frekvence 50 Hz (ali 60 Hz) z nazivno napetostjo višjo od 1000 V [4].

Pod pojmom varovalka v splošnem razumemo sklop večjih sestavnih delov, ki opravljajo funkcijo pretokovne zaščite.:

Visokonapetostne varovalke so sestavljene iz dveh delov »taljivi vložek« in »podstavek taljivega vložka«. Glede na sposobnost omejevanja toka delimo VV taljive vložke na:

- a) **Tokovno omejitni taljivi vložki »Current-limiting types«** Ta tip se uporabljajo v večjem delu sveta, v Evropi več kot 95 %. Namenjeni so tako za zunanjo uporabo (zaščita zunanjih energetskih transformatorjev) kot tudi za uporabo v notranjih prostorih - stikalnih celicah. Te so v osnovi cilindrične oblike, različnih dolžin in maksimalnega premera 88 mm. Takšen tip taljivega vložka je narejen iz keramične cevi, na katero sta pritrjena kontakta, med kontaktoma je notranjosti cevi nameščen keramični nosilec, na katerega je spiralno navit eden ali več vzporednih srebrnih taljivih elementov. Notranjost cevi je napolnjena s kremenčevim peskom natančno določene kemijske strukture in granulacije. Kremenčev pesek je poleg pravilne konstrukcije taljivega elementa in kvalitetne, temperaturno odporne cevi najpomembnejši element pri pravilnem gašenju električnega obloka, ki nastane v primeru stalitve taljivega elementa. Celotna faza gašenja obloka je torej izvršena v notranjosti cevi, zunanjih znakov faze prekinitve prevelikega toka skozi varovalko torej ni. Ta tip varovalk lahko prekine tokokrog še pred prehodom toka skozi nič, torej so izklopni časi pri velikih tokih lahko tudi v rangu nekaj milisekund.
- b) **Tokovno neomejitni taljivi vložki »Non-current-limiting types«**. Drugo ime zanje je tudi **izpušni** ali **»ekspulzijski«** taljivi vložek in razlikuje po principu prekinjanja električnega obloka. Ta tip varovalke lahko prekine tokokrog le v trenutku prehoda toka skozi nič, zato so lahko oblok gori tudi celo polperiodo ali še več. Večinoma se uporabljajo v Angliji in v državah zgodovinsko povezanimi z njo (Indija, Avstralija, Južna Afrika,). Konstrukcija ekspulzijskih taljivih vložkov se precej razlikuje od opisanih v točki a. Osnovna razlika je v tem, da notranjost cevi (iz organskih materialov) ni napolnjena s kremenčevim peskom. Ti talilni vložki so izključno namenjeni za zunanjo uporabo, predvsem zaradi posledic, ki se pojavljajo v fazi prekinitve taljivega vložka oz. ugasnitve nastalega električnega obloka. Manjši tokovi preobremenitve so večinoma prekinjeni v notranjosti cevi, toda v primeru večjih tokov preobremenitve se nastali oblok in z njim povezani nastali plini pojavijo v okolici-zunanosti cevi. Zaradi posebne konstrukcije se spremeni tudi osnovni položaj cevi – le ta pade iz osnovnega - začetnega položaja navzdol, kar je tudi zunanji znak, da je taljivi vložek pregorel.

3.2 Opis VV« back-up« taljivih vložkov

V tem prispevku se podrobneje posvečamo visokonapetostnim taljivim vložkom z lastnostjo omejevanja toka v omejenem področju, torej »Current-limiting« varovalkam, za uporabo v sistemih do napetosti 36 kV.

Osnovne dimenzije predpisuje standard DIN43625 lastnosti in osnovne karakteristike pa standard IEC 60282-1. V tem standardu so definirane tri vrste karakteristik in sicer:

- »**Back-up**« taljivi vložki, ki so sposobni prekiniti preobremenitvene tokove v omejenem področju vse od nekega minimalnega toka I_{\min} ($I_{\min} = 3$ do $5 \cdot I_n$) ki ga določi proizvajalec do polne nazivne izklopne zmogljivosti I_1 (običajno 25 kA, 40 kA, 50 kA, 63 kA)
- »**General purpose**« taljivi vložki, ki so sposobni prekiniti preobremenitvene tokove v območju med nazivno izklopno zmogljivostjo I_1 in do tistega toka, ki povzroči pregorete taljivega vložka v 1 uri.
- »**Full range**« taljivi vložki, ki so sposobni prekiniti preobremenitvene tokove od nazivne izklopne zmogljivosti I_1 vse do tistega toka, ki povzroči pregorete taljivega vložka.

V praksi je najpomembnejša karakteristika »Back-up«, torej karakteristika taljivih vložkov za zaščito v omejenem tokovnem področju. Uvrščena je v proizvodne programu večine Evropskih proizvajalcev ko so: SIBA-Nemčija, JEAN MUELLER-Nemčija, SIEMENS-Nemčija, DRIESCHER-Nemčija, EFEN-Nemčija, ALSTOM-Francija, MERLIN-GERIN (SCHNEIDER)-Francija, MESA-Španija, INAEL-Španija in ABB-Poljska in seveda tudi **ETI Izlake**.

Ocenjena letna proizvodnja v Evropi je več kot **1.500.000 kosov** in ETI Izlake predstavlja pomemben del v tem številu, saj predstavlja **več kot 10 % evropske proizvodnje**. Še pomembnejši delež ETI-ja pa se skriva v dejstvu, da je dobavitelj keramičnih cevi in nosilcev za večino od zgoraj naštetih konkurentov – letna proizvodnja cevi za konkurenčne proizvajalce je več kot 1.000.000 kosov.

ETI Izlake je v letu 2004 razvil popolnoma novo serijo VV taljivih vložkov za zaščito v omejenem področju tokovne osi - »Back-up« taljivi vložki – imenovano tudi **VV-THERMO**. Podrobnejše lastnosti so opisane v posebnem prospektu in tehničnih navodilih proizvajalca, tu naj navedemo samo najpomembnejše:

- Izgubne moči (to je moč, ki se sprošča na varovalki, ko skozi njo teče nazivni tok) nove serije tudi do **40% nižje od prejšnje generacije** in so popolnoma primerljive z največjimi Evropskimi konkurenti, kot je naprimer SIBA. Prav zaradi te lastnosti namerava ETI d.d. povečati tržni delež v Evropi vsaj na **15%**
- Poleg standardnega indikatorskega sistema s silo udarne igle (udarjala) **50 N** uvajamo v ponudbo še dva indikatorja s silo igle **80 N in 120 N**. Posebna lastnost teh dveh indikatorjev je, da imata vgrajen poseben – temperaturno občutljiv del, ki v primeru, da je varovalka izpostavljena povečanim temperaturam okolice (okoli 140 °C) signalizira – udarna igla izskoči. Poudariti je potrebno, da termično odvisni del v indikatorju reagira neodvisno od vzroka, ki je povzročil povečano segrevanje – vzrok je lahko ali električne narave (skozi taljivi vložek dalj časa teče povečan tok, ki jo prekomerno pregreva) ali pa je vzrok pregrevanja zunanje narave – indikator v vsakem primeru signalizira, da je nekaj narobe.
- Poleg standarnih dolžin VV taljivih vložkov (192 mm za 7,2 kV, 292 mm za 12 kV, 442 mm za 24 kV in 537 mm za 36 kV) je ETI sposoben trgu ponuditi tudi t.i. »nestandardne« talilne vložke. Kupci namreč večkrat želijo vgraditi npr. 12 kV taljive vložke v 24 kV ohišju, ker ne želijo menjati podstavkov, ko zamenjajo glavni energetski transformator. Primer je elektrodistribucija Belgije, ki vgrajuje 17,5 kV talilne vložke v cevi dolžine 292 mm, torej v 12 kV ohišju.

- Celotna serija **12 kV (10 A do 160 A)** in **24 kV (10 A do 100 A)** je certificirana na vodilnem evropskem visokonapetostnem inštitutu **CESI Milano**. Poleg tega smo pozitivno opravili tudi certificiranje na vodilnem inštitutu za področje Azije in sicer **KERI ChangWon** v J.Koreji za celotni seriji **7,2 kV (10 A do 160 A)** in **24 kV (10 A do 160 A)**.

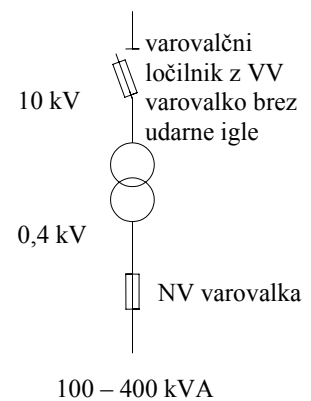
4. UPORABA VAROVALK ZA ZAŠČITO TRANSFORMATORJEV

4.1 Izvedbe zaščit distribucijskih transformatorjev

Zaščita distribucijskih transformatorjev je najpogosteje izvedena s pomočjo taljivih varovalk in stikal. V praksi obstajajo štiri možne izvedbe:

4.1.1 Varovalke na visoki in nizki napetosti

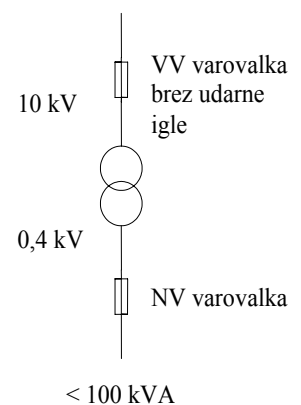
Ta zaščita se uporablja za transformatorje najmanjših moči (do 100 kVA). V tem primeru mora biti omogočen izklop napetosti na visokonapetostni strani pred varovalkami. Visokonapetostne varovalke ne potrebujejo udarne igle. Ta izvedba je najcenejša in se uporablja za transformatorske postaje na drogu.



Slika 6: Izvedba zaščite z varovalkami na nizkonapetostni in visokonapetostni strani

4.1.2 Varovalčni ločilnik na visokonapetostni strani in varovalke na nizkonapetostni strani

Varovalčni ločilnik na visokonapetostni strani omogoča izklop napajanja in vidno ločitev. Z ločilnikom se seveda ne sme izklapljeti pod obremenitvijo. Tak način se prav tako uporablja na drogovih za transformatorje moči od 100 do 400 kVA.

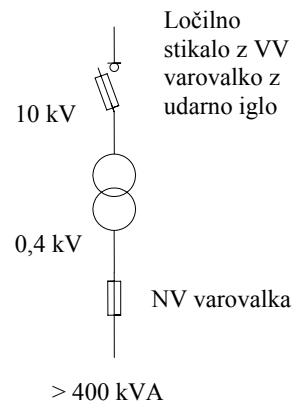


Slika 7: Izvedba zaščite z varovalčnim ločilnikom na VN strani in varovalkami na nizkonapetostni strani

4.1.3 Ločilno stikalo v kombinaciji z varovalkami na visokonapetostni strani in varovalke na nizkonapetostni strani

Tak koncept se uporablja v zaprtih transformatorskih postajah za moči nad 400 kVA. Bistvena prednost ločilnega stikala pred ločilnikom je zmožnost izklapljanja nazivnih tokov.

Slika 8: Izvedba zaščite z ločilnim stikalom na VN strani in varovalkami na nizkonapetostni strani



Taka stikala so praviloma opremljena s sprožilnim mehanizmom ki ga sproži udarna igla v varovalki. Kratki stik v eni ali dveh fazah povzroči pregoretnje ene varovalke, ki s pomočjo udarne igle sproži izklopni mehanizem. Izvedba z ločilnim stikalom omogoča tripolne izklope tudi pri enofaznih ali dvofaznih kratkih stikih.

4.1.4 Čebuljeva zaščita

Varovanje s Čebuljevo zaščito je nadgradnja zaščite opisane v prejšnjem poglavju. Čebuljeva zaščita meri tok na sekundarju in v primeru preobremenitve izklopi ločilno stikalo na primarju. Smisel in prednosti te zaščite bodo razvidne v nadaljevanju.

4.2 Vpliv obratovalnih stanj transformatorja na delovanje varovalk

Pri izboru varovalk moramo upoštevati določene smernice, ki omogočajo normalno, varno in optimalno delovanje transformatorjev:

- Varovalke ne smejo pregoreti ob vklopnem pojavu;
- Varovalke morajo omogočiti nemoteno delovanje transformatorja pri nazivni obremenitvi;
- V primeru preobremenitve morajo pravočasno izklopiti, tako da ne pride do pregrevanja in s tem poškodb transformatorja;
- Selektivni izklop pri okvarah ali preobremenitvi na sekundarnem omrežju. Izklopiti morajo le varovalke na sekundarju;
- Primarne varovalke morajo uspešno zaščititi transformator in zbiralke v primeru okvare pred, v ali za transformatorjem, vendar pred nizkonapetostnimi varovalkami.

Transformatorske postaje lahko delujejo v vseh obratovalnih stanjih, zato morajo biti varovalke izbrane tako, da to tudi omogočajo.

Primer

V nadaljevanju je prikazan izbor ustreznih varovalk glede na posamezno obratovalno stanje. Za lažje razumevanje je narejen tudi praktični primer dimenzioniranja varovalk.

Primer je narejen za transformator s podatki:

Nazivna napetost primarja $U_{n1} = 10 \text{ kV}$

Nazivna napetost sekundarja $U_{n2} = 0,4 \text{ kV}$

Nazivna moč $S_n = 630 \text{ kVA}$

Kratkostična napetost $u_k = 4,41\%$

Nazivna toka (primar, sekundar) $I_{n1} = 36,3 \text{ A}$, $I_{n2} = 909 \text{ A}$

4.2.1 Prosti tek transformatorja

Prosti tek transformatorja ne predstavlja nobenega problema. Sekundarni tok ne teče, zato te varovalke niso obremenjene. Na primarni strani teče le magnetilni tok transformatorja, ki znaša okoli 5%. Na segrevanje talilnega elementa v varovalki vpliva efektivna vrednost toka, zato tudi velika vsebnost višjih harmonikov v magnetilnem toku ne povzroča dodatnega segrevanja taljivega elementa v varovalki. Glede na prosti tek transformatorja moramo izbrati primarne varovalke z nazivnim tokom večjim od efektivne vrednosti toka praznega teka.

Primer

Nazivni tok VV varovalke: $I_{n,VV,pt} > 36,3 \cdot 0,04 = 1,45 \text{ A}$

4.2.2 Nazivna obremenitev

Pri nazivni obremenitvi transformatorja teče skozi primar in sekundar nazivni tok. Če želimo omogočiti trajno delovanje transformatorja pri nazivni obremenitvi moramo izbrati varovalke z nazivnim tokom večjim ali enakim nazivnemu toku transformatorja. Pri cikličnem nazivnem obratovanju, so možne tudi občasne preobremenitve, vendar je časovna konstanta segrevanja taljivega elementa večja kot časovna konstanta segrevanja transformatorja. To pomeni, da varovalka, ki je izbrana na osnovi nazivnega toka zagotovo zdrži tudi te preobremenitve.

Primer

Nazivni tok NV varovalke: $I_{n,NV,n} > 909 \text{ A}$

Nazivni tok VV varovalke: $I_{n,VV,n} > 36,4 \text{ A}$

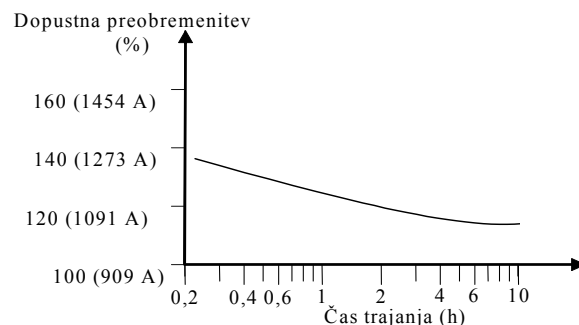
4.2.3 Preobremenitev

Kot je opisano v poglavju 2.3 lahko transformator kratkotrajno preobremenimo. Varovalke morajo to preobremenitev dopuščati, vendar ne dlje kot je to sprejemljivo za transformator. Varovalke morajo biti izbrane tako, da pregorijo preden se temperatura vroče točke transformatorja dvigne nad dopustno vrednost. Pri tem je potrebno upoštevati namembnost transformatorja in klimatske pogoje v katerih transformator deluje.

Na podlagi diagrama dopustnega trajanja preobremenitve dopustne lahko preprosto izračunamo dopustni sekundarni tok in narišemo diagram dopustnega toka, glede na čas trajanja.

Primer

Slika 9: Dopustno trajanje preobremenitve za distribucijski transformator 630 kVA, pri normalnih temperaturah okolice.

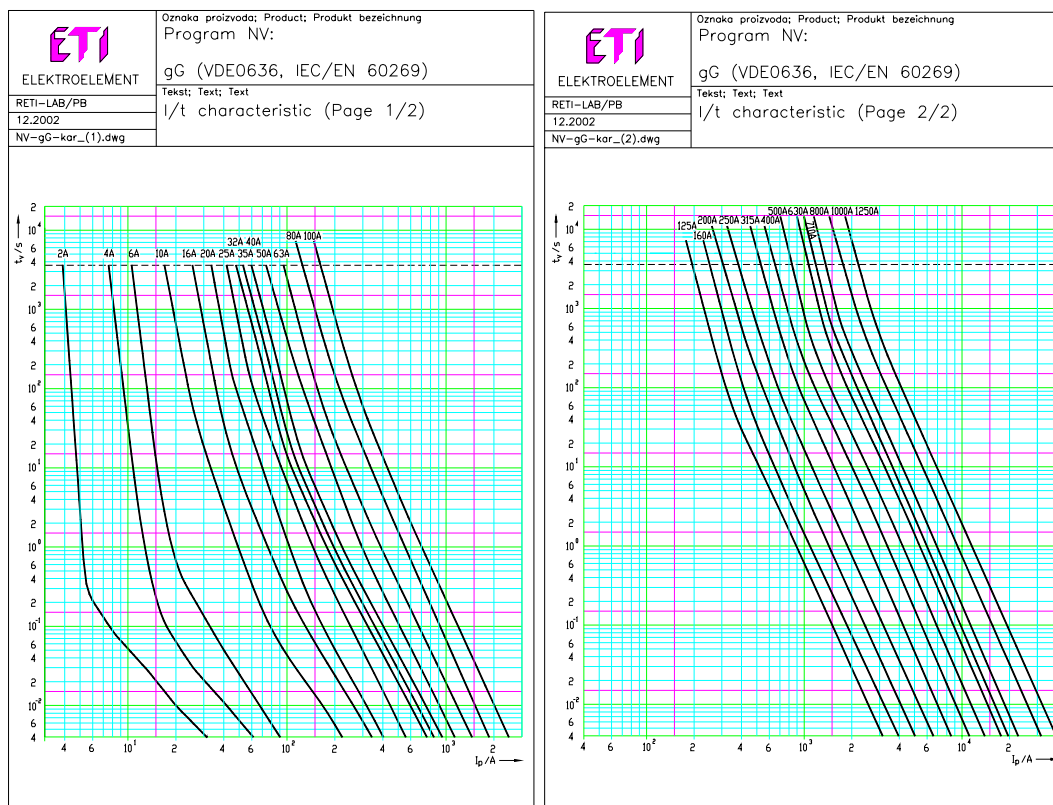


Izberemo lahko katerokoli od varovalk, ki lahko zaščitijo transformator. Na podlagi dopustnega trajanja preobremenitve (slika 9) in karakteristike NV varovalk (slika 10) moramo prekontrolirati tri točke:

- maksimalni tok v času 0,2 h (720 s)
- maksimalni tok v času 1 h (3600 s)
- pri toku $1,6 \cdot I_n$, pri katerem varovalke zagotovo izklopijo v času podanem v preglednici 1

Preglednica 1: Minimalni časi izklopa varovalke pri $1,6 \cdot I_n$

nazovni tok varovalk	čas izklopa
16 A – 63 A	< 1 h
80 A – 160 A	< 2 h
200 A – 400 A	< 3 h
> 400 A	< 4h



Slika 10: $I-t$ karakteristika NV gG varovalk

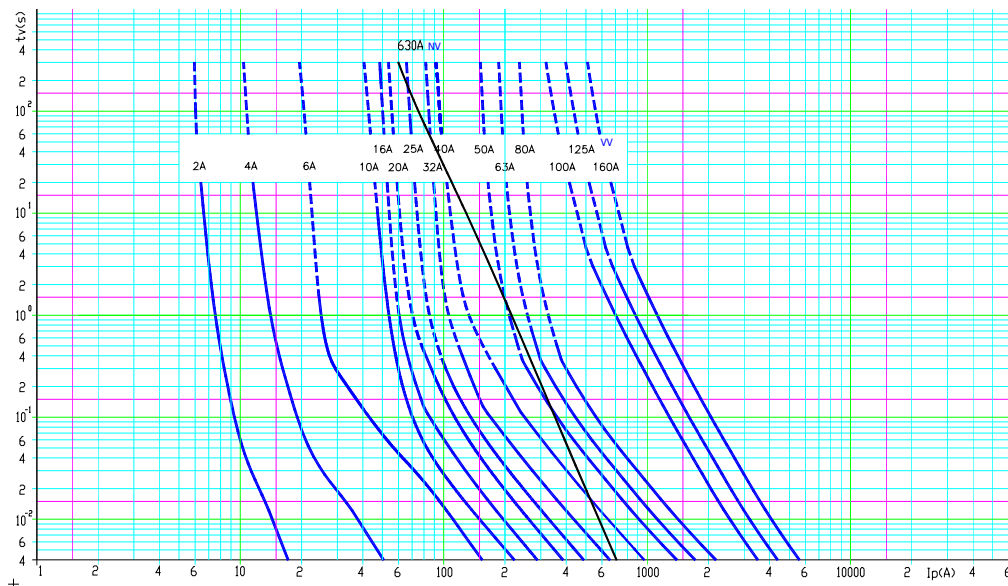
Zaradi optimalne izkoriščenosti transformatorja bomo seveda izbrali varovalko z največjim še dopustnim nazivnim tokom, ki uspešno zaščiti transformator v vseh treh točkah:

Primer

- a) (0,2 h) Ustreza varovalka z maksimalnim nazivnim tokom: VN 3 gG 630 A
 - b) (1 h) Ustreza varovalka z maksimalnim nazivnim tokom: VN 3 gG 630 A
 - c) ($1,6 \cdot I_n$) Ustreza varovalka z maksimalnim nazivnim tokom: VN 3 gG 630 A
- Nazivni tok NV varovalke: $I_{n,NV, preob} \leq 630 \text{ A}$

Pri izboru varovalk na visokonapetostni strani moramo zagotoviti selektivnost varovanja. Pri preobremenitvi mora tok prekiniti sekundarna varovalka pred primarno. Kontrolo selektivnosti izvedemo tako, da delovanje $i-t$ karakteristiko NV varovalke preslikamo na visokonapetostno stran. Na podlagi prestavnega razmerja izračunamo toke, ki tečejo na

primarju, ko deluje varovalka na sekundarju. Praktično to pomeni, da krivuljo $i-t$ karakteristike prestavimo na diagramu za prestavno razmerje in v ta diagram vrišemo $i-t$ karakteristike VV varovalk. Selektivnost praviloma zagotovimo s tem, da je krivulja izbrane VV varovalke desno od fiktivne krivulje NV varovalke.



Slika 11: $I-t$ karakteristika VV varovalk z vrisano transformirano karakteristiko NV 630 A Gg varovalke

Zagotavljanje selektivnosti pri kateremkoli toku okvare je pomembno predvsem zaradi ekonomskih razlogov, saj so VV varovalke bistveno dražje od NV varovalk. Glede na zanesljivost in varnost delovanja lahko VV varovalka izklopi tudi pred NV varovalko, vendar je potrebno upoštevati, da določene izvedbe VV varovalk (Back-up) niso sposobne izklapljati vseh okvarnih tokov. V tem primeru moramo za te okvarne toka zagotoviti selektivnost delovanja ne glede na ekonomske zahteve.

Primer

$$I_{n,VV, \text{preob}} \geq 50 \text{ A (tehnično zadovoljivo)}$$

$$I_{n,VV, \text{preob}} \geq 63 \text{ A (ekonomsko zadovoljivo)}$$

4.2.4 Vklop transformatorja

Pri vklopu transformatorja se na primarju pojavljajo veliki zagonski tokovi. Ti tokovi lahko dosežajo tudi 10 kratnik nazivnega toka in trajajo nekaj deset period. Primarne varovalke morajo ta tok zdržati, sicer zagon transformatorja sploh ni mogoč. Za izračun ustrezne varovalke je potrebno upoštevati juole-ov integral od začetka prehodnega pojava do trenutka, ko tok pade na vrednost nazivnega toka transformatorja oz. varovalke. Proizvajalci transformatorjev tega podatka ne podajajo, zato direkten izračun nazivnega toka varovalke ni možen. V praksi pa se je izkazalo, da prehodni pojav ne povzroči delovanja varovalke, če je ta za vsaj dve standardni vrednosti nazivnega toka višja od nazivnega toka transformatorja. Za lažji izbor varovalke lahko uporabimo priporočila proizvajalcev (preglednica 2)

Preglednica 2: Priporočene VV varovalke za zaščito distribucijskih transformatorjev (ETI)

Nazivna moč transformatorja (kVA)	6/7,2 kV				10/12 kV				20/24 kV				30/36 kV			
	Nazivni primarni tok transformatorja (A)		Nazivni tok varovalke		Nazivni primarni tok transformatorja (A)		Nazivni tok varovalke		Nazivni primarni tok transformatorja (A)		Nazivni tok varovalke		Nazivni primarni tok transformatorja (A)		Nazivni tok varovalke	
	za 6kV	za 7.2kV	I _{Fmin} (A)	I _{Fmax} (A)	za 10kV	za 12kV	I _{Fmin} (A)	I _{Fmax} (A)	za 20kV	za 24kV	I _{Fmin} (A)	I _{Fmax} (A)	za 30kV	za 36kV	I _{Fmin} (A)	I _{Fmax} (A)
50	4.8	4.1	10	16	2.9	2.4	6	10	1.5	1.2	4	6	0.96	0.8	2	4
75	7.2	6.2	16	20	4.3	3.6	10	16	2.2	1.8	4	6	1.4	1.2	4	6
100	9.6	8.2	25	32	5.8	4.8	10	16	2.9	2.4	6	10	1.9	1.6	6	10
125	12.1	10.3	32	40	7.2	6	16	20	3.6	3.0	6	10	2.4	2.0	6	10
160	15.4	13.2	40	50	9.2	7.7	20	25	4.6	3.8	10	16	3.1	2.6	6	10
200	19.2	16.4	40	50	11.5	9.6	25	32	5.8	4.8	10	16	3.8	3.2	10	16
250	24.1	20.6	50	63	14.4	12	32	40	7.2	6.0	16	20	4.8	4.0	10	16
315	30.3	26	50	63	18.2	15.2	40	50	9.1	7.6	20	25	6.1	5.1	16	20
400	38.5	33	63	80	23	19.2	50	63	11.5	9.6	25	32	7.7	6.4	20	25
500	48.1	41.2	80	100	28.8	24	50	63	14.4	12	32	40	9.6	8.0	20	25
630	60.6	51.9	100	125	36.4	30.3	63	80	18.1	15.2	40	50	12.1	10.1	25	32
800	76.9	66	100	125	46.2	38.5	80	100	23.1	19.2	50	63	15.4	12.8	40	50
1000	96.2	82.5	125	160	57.7	48.1	100	125	28.8	24.1	50	63	19.2	16.0	50	63

4.2.5 Kratki stik

Kratki stik na NN omrežju (KS 3 slika)

V primeru kratkega stika na nizkonapetostnem omrežju mora tok prekiniti NV varovalka še preden ta škodno vpliva na transformator. Transformatorji so projektirani tako, da zdržijo kratkostični tok 2 do 3 sekunde. Če predpostavimo neskončno močno omrežjo pred transformatorjem je kratkostični tok odvisen le od karakteristik transformatorja in znaša :
Na podlagi tega toka in dopustnega časa delovanja v kratkem stiku (2 s) izberemo varovalko z največjim nazivnim tokom, ki še uspešno zaščiti transformator.

Primer

Tok kratkega stika lahko izračunamo po enačbi 1:
$$I''_{k,KS1} = \frac{100 \cdot 630}{0,4 \cdot 4,41} = 35,7 \text{ kA}$$

Nazivni tok NV varovalke: NV varovalka z nazivnim tokom 1000 A izklopi v času 2 s tok 8,1 kA. Kratkostični tok 35,7 kA pravočasno izklopi katerakoli NV varovalka.

$$I_{n,NV,KS1} \leq 1000 \text{ A}$$

Kratek stik na sekundarni strani pred NV varovalkami (KS 2 slika 5)

V tem primeru je pristop popolnoma enak kot v prejšnji točki, le da dimenzioniramo VV varovalke.

Primer

Tok kratkega stika lahko izračunamo po enačbi 2: $I''_{k,KS2} = \frac{100 \cdot 630}{20 \cdot 4,41} = 714 \text{ A}$

Nazivni tok VV varovalke: $I_{n,VV,KS2} \leq 125 \text{ A}$

Kratek stik med VV varovalkami in transformatorjem (KS 1 slika)

V tem primeru je pomembna le izklopna zmogljivost varovalke, ki mora biti večja kot je kratkostični tok v omrežju.

5. IZBOR VAROVALK ZA ZAŠČITO TRANSFORMATORJEV

Za uspešno zaščito transformatorjev moramo izbrati varovalko s takšnim nazivnim tokom, da ustreza zahtevam vseh obratovalnih stanj. Za lažjo predstavo smo naredili preglednici, ki nakazujeta katere varovalke lahko uporabimo, da zadostimo zahtevam posameznega obratovalnega stanja.

Primer

Preglednica 3: Ustreznost varovalk NV za posamezno obratovalno stanje

NV-Gg	16	20	25	32	35	40	50	63	80	100	125	160	200	250	300	355	400	450	500	630	800	1000	1250	
prazni tek	Ni definirano, ker sekundarni tokokrog ni sklenjen.																							
naz. obremenitev																							●	●
preobremenitev	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●			
kratki stik	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
vklop transf.	Ni definirano, ker vklopni tok ne vpliva na sekundarni tokokrog.																							

Preglednica 4: Ustreznost varovalk VV za posamezno obratovalno stanje

VV	6	10	16	20	25	32	40	50	63	80	100	125	160
prazni tek	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
naz. obremenitev							●	●	●	●	●	●	●
preobremenitev								○ ¹⁾	●	●	●	●	●
kratki stik	●	●	●	●	●	●	●	●	●	○ ²⁾	○ ²⁾	○ ²⁾	
vklop transf.								●	●	●	●	●	●

● – dopustno; ○¹⁾ – dopustno vendar ekonomsko ni opravičljivo; ○²⁾ – dopustno, vendar zaradi ekstremnih mehanskih in termičnih obremenitev ni priporočljivo

Kot vidimo na pregl.4 je optimalni nazivni tok visokonapetostne varovalke za naš primer 63 A.

Na pregl.3 pa ne moremo določiti niti ene NV varovalke, ki bi ustrezno zaščitila transformator pri vseh obratovalnih stanjih. Še najbližje sta 630 A in 1000 A varovalka. Z izborom 630 A varovalke smo zagotovo zaščitili transformator v vseh obratovalnih pogojih, vendar transformator ne more delovati trajno pri nazivnem toku. Z izbiro 1000 A varovalke, pa lahko transformator maksimalno izkoristimo, vendar ga ne ščitimo v primeru določenih preobremenitev. Če bi izbrali 800 A varovalko bi s tem naredili nek kompromis med varnostjo in izkoriščenostjo.

Ta problem se rešuje s Čebuljevo zaščito. Pri tem konceptu merimo tok na sekundarni strani transformatorja, zaščitna naprava v primeru nevarne preobremenitve izklopi napajanje transformatorja z izklopom ločilnega stikala na primarju.

6. SKLEP

Še tako natančno dimenzioniranje varovalk ne zagotavlja ustrezne zaščite transformatorja, če so uporabljene slabe, nezanesljive varovalke. Zato je zelo pomembno, da se vgrajujejo varovalke priznanih proizvajalcev z ustreznimi potrdili in certifikati. Prav tako takšni proizvajalci (npr. ETI Elektroelement) ponujajo varovalke (VV Thermo), ki nam poleg osnovnih funkcij ponujajo še dodatne prednosti. Zmanjšanje izgubne moči bistveno lajšajo probleme z hlajenjem. Večje sile udarnih igel zagotavljajo zanesljivejše delovanje prigradenih ločilnih stikal. Termo odvisni elementi pa omogočajo signalizacijo in posredno izklop napajanja v primeru požara ali drugega vzroka povišanja temperature v transformatorski postaji.

LITERATURA

- [1] Electric fuses 3 edition (2004) P.G. Newbeary in A. Wright
- [2] Varovanje elektroenergetskih naprav; Ivan Novak; Skripta; Visoka tehniška šola v Mariboru 1975
- [3] Izbrana poglavja iz transformatorjev; Ivan Zagradišnik; Bojan Slemnik; Skripta 1. izdaja; UM FERI, Maribor 2003
- [4] IEC 60282.1(BS 2692:Part 1), Fifth edition 2002-01 »High-voltage fuses Part 1: Current limiting fuses«,
- [5] IEC 60282.2(BS 2692:Part 2), »High-voltage fuses Part 2: Expulsion fuses«
- [6] IEC 60549 (BS 5564), External protection of shunt capacitors.
- [7] IEC 60644 (BS 5907), Motor circuit application
- [8] IEC 60787 (BS 6553), Transformer circuit application
- [9] IEC 60354 Loading guide for oil-immersed power transformer 1991-09
