

Galios transformatoriø gedimø prognozavimas panaudojant neraiðkiø aibiø teorijà iðtirpusiø dujø analizei

Algimantas Navickas,

Birutė Linkevièiūtė

*Kauno technologijos universitetas,
 Elektros sistemos katedra,
 Studentø g. 48, LT-51367 Kaunas*

Darbe apþvelgti iðtirpusiø dujø analizės (IDA) metodai. Neraiðkiø aibiø teorijos pagrindu iðtirtas jungtinio neraiðkiø IEC kodø–pagrindiniø dujø (NKPD) metodo taikymas transformatoriø (TR) gedimø pobūdþiui nustatyti. Nustatyta, jog tradicinis IEC dujø santykiø kodø metodas parodo tik vienà vyraujantà gedimà, tuo tarpu jungtinis NKPD metodas leidþia kiekybiðkai ávertinti kiekvieno gedimo tikimybæ ir nustatyti daugybinius TR gedimus. Gauti rezultatai atitinka realius TR gedimus.

Raktaþodþiai: galios transformatorius, iðtirpusiø dujø analizė, neraiðkios aibės, priklausomumo funkcija, gedimas

1. ÁVADAS

Galios transformatorius yra vienas pagrindiniø energetikos sistemos árenginiø. Tinkamas jo veikimas turi átakos visam sistemos darbui, todėl labai svarbu gedimus rasti dar jø vystymosi stadijoje. Tai didina elektros energijos perdavimo patikimumà, sumaþina neplanuotø iðjungimø tikimybæ, ágalina ið anksto numatyti rekonstrukcijas ir remontus. Laiku paðalinus gedimus, galima iðvengti TR avarijø, sumaþinti aptarnaujanèio personalo darbo rizikà.

Sugedus TR, pradeda veikti relinë apsauga, kuri paðalina transformatoriø ið veikianèios sistemos. Tokiais atvejais negalima iðvengti prastovø. Dël ðios prieþasties svarbu sukurti prevencines priemones, leidþianèias nustatyti gedimus ankstyvoje stadijoje ir iðvengti dideliø sistemos nuostoliø. Viena tokiø efektyviø priemoniø, padedanèiø aptikti TR gedimus pradinėje stadijoje, yra iðtirpusiø dujø analizė. Taèiau pastaruoju metu IDA interpretacijai yra siûlomi modeliai, pagrãsti neraiðkiomis aibėmis, dirbtiniais neuroniniais tinklais ar ekspertiniemis sistemomis [1–5], leidþian-

tys diagnozuoti transformatoriø gedimus ir prognozuoti jø eksploatacijos reþimus.

Darbo tikslas – iðtirti neraiðkiø aibiø metodo pritaikymo iðtirpusiø dujø analizei ir transformatoriø gedimø prognozavimui galimybæ. Remiantis jungtiniu neraiðkiø kodø – pagrindiniø dujø metodu kiekybiðkai ávertinamos gedimø tikimybės ir nustatomi TR galimi gedimai.

2. GALIOS TRANSFORMATORIAUS DIAGNOSTIKOS METODAI

Veikianèiam TR turi átakos elektriniai ir terminiai veiksniai, kurie gali suardyti izoliacines medþiagas ir iðskirti dujiniø dekompozicijos produktø. Alyvoje iðtirpusiø dujø (ID) sudėtis priklauso nuo transformatoriuje besivystanèio gedimo. Pagal gautà alyvoje iðtirpusiø dujø sudėtà bei kiekà galima apytiksliai nustatyti besivystanèio gedimo kilmæ ir prieþastà

TR bûklei ávertinti ir galimiems gedimams prognozuoti yra taikomi ávairūs kontrolės metodai. Vieni jø yra kokybinio, kiti – kiekybinio pobūdþio, kurie remiasi statistikos principais [6, 7]. Tipinio transformatoriaus diagnostikos procedûros schematiškai parodytos 1 paveiksle.

2 paveiksle parodyta TR galimo gedimo pobūdþiui nustatyti taikomø metodø klasifikacija.

Iðtirpusiø dujø analizės metodai yra pagrãsti iðtirpusiø dujø santykiais ar dujø

1 lentelė. Tradiciniø IDA metodø pagrindiniø dujø santykiai

Metodas	Dujø santykiai
Doernenbergo	$CH_4/H_2; C_2H_2/C_2H_4; C_2H_6 /C_2H_2; C_2H_2/CH_4$
Rodþerio	$CH_4/H_2; C_2H_6/CH_4; C_2H_4/C_2H_6; C_2H_2/C_2H_4$
IEC 599–1978	$C_2H_2/C_2H_4; CH_4/H_2; C_2H_4/C_2H_6$
Diuvalio trikampis*	$\% C_2H_2; \% C_2H_4; \% CH_4$

* $\%_o$ (dujos) yra apskaièiuojamos pagal formulæ $\%_o$ (dujos) = $\frac{100 \times \text{dujos}}{\sum_{i=1}^3 \text{dujos}(i)}$.

koncentracija %. 1 lentelėje pateikti kai kurių IDA metodų pagrindiniai dujų santykiai.

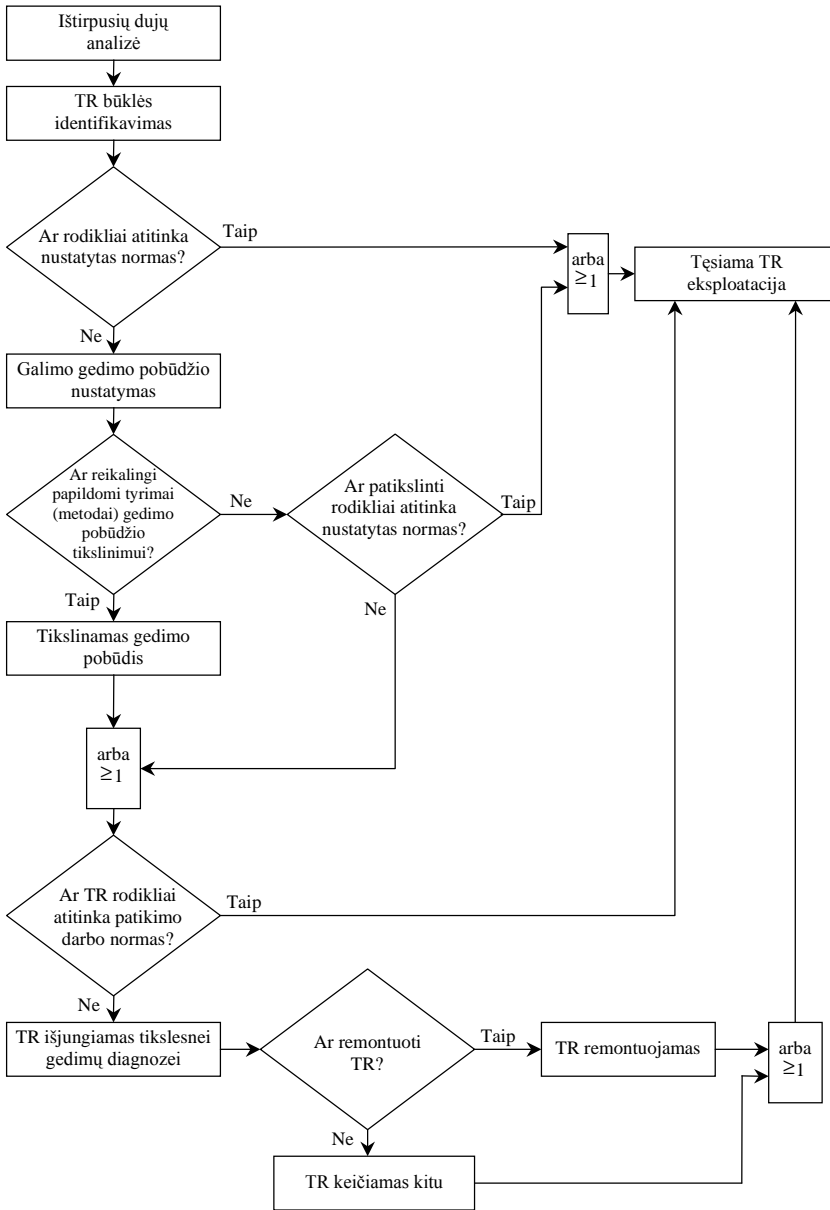
Tačiau kai kuriais atvejais IDA transformatorių gedimų prognozei yra nepakankama. Normaliu atveju tai

atsitinka tada, kai transformatoriuje yra keletas gedimų iš karto. Tradiciniai IDA diagnostiniai metodai iš esmės remiasi tik dujomis, kurias sukelia pagrindinis gedimas ar vienas vyraujantis iš keleto gedimų, santykiu.

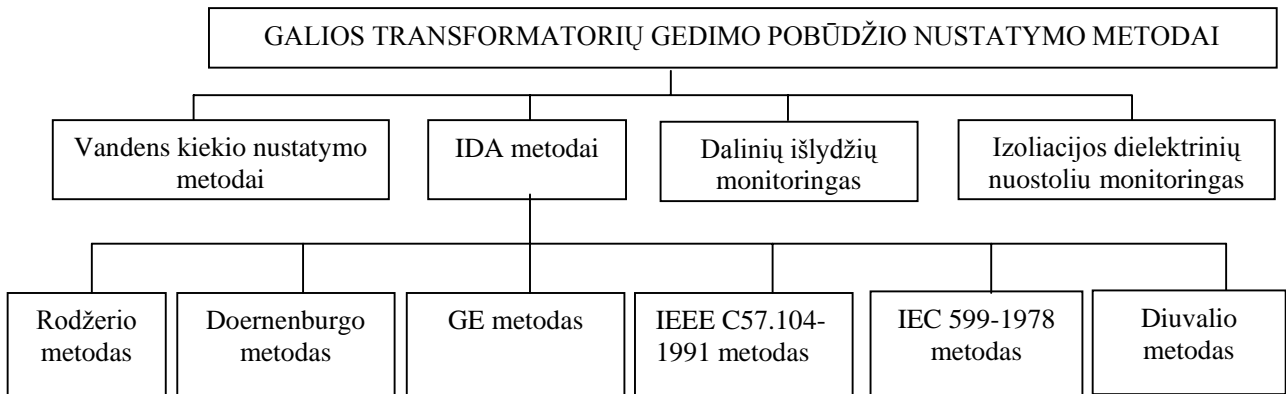
Tikslesnei TR gedimų analizei galima taikyti modernesnius analizės metodus, pagrįstus dirbtinio neuronų tinklo, neradiškio aibių teorija ar pan. [1–5].

3. IŠTIRPUSIŲ DUJŲ ANALIZĖS IEC KODAI

Stebint galios TR, išoriškai jis gali atrodyti tinkamu, tuo tarpu viduje gali pradėti vystytis tam tikras nusidėvėjimas, ir jis gali sąlygoti netikėtą darbo baigtą. Remiantis tyrėjų patirtimi, galima teigti, kad beveik 80% visų gedimų yra sąlygoti besivystančio nusidėvėjimo. Todėl gedimai turi būti identifikuojami ir jė vengiama pačioje ankstyviausioje stadijoje. Tačiau svarbu gedimus aptikti neatjungus TR nuo štampos. Dėl problemai spręsti naudojama IDA. Teoriškai, jei besivystantis ar aktyvusis gedimas jau yra, tai atskiro ištirusių dujų koncentracija, dujų santykis, bendra degiojų dujų (TCG) ir celiuliozės degradacija ženkliai padidėja. Naudojant dujų chromatografiją analizuoti dujomis, ištirusioms izoliacinėje alyvoje, galima spręsti apie besivystančių gedimų tipus. Yra nagrinėjamos tokios tipiškos dujos: vandenilis (H_2), metanas (CH_4), etanas (C_2H_6), etilenas (C_2H_4), acetilenas (C_2H_2), an-



1 pav. Transformatoriaus diagnostikos procedūros



2 pav. Galios transformatorių galimo gedimo pobūdžio nustatymo metodų klasifikacija

2 lentelė. IEC dujø santykiø kodai

C_2H_2/C_2H_4	CH_4/H_2	C_2H_4/C_2H_6	Santykio dydis
0	1	0	< 0,1
1	0	0	0,1–1
1	2	1	1–3
2	2	2	> 3

3 lentelė. Gedimo pobūdþio kodai

Ged. Nr.	Gedimo kodas			Gedimo pobūdis
	C_2H_2/C_2H_4	CH_4/H_2	C_2H_4/C_2H_6	
1	0	0	0	Natūralus senėjimas
2	0	1	0	Maþos energijos dalinis išlydis
3	1	1	0	Didelės energijos dalinis išlydis
4	1–2	0	1–2	Maþos energijos elektros lanko iškrova
5	1	0	2	Didelės energijos elektros lanko iškrova
6	0	0	1	Pemos temperatūros ðiluminis gedimas (< 150°C)
7	0	2	0	Pemos temperatūros ðiluminis gedimas (150–300°C)
8	0	2	1	Vidutinės temperatūros ðiluminis gedimas (300–700°C)
9	0	2	2	Aukðtos temperatūros ðiluminis gedimas (> 700°C)

glies monoksidas (CO) ir dioksidas (CO₂).

Ið IDA metodø daþniausiai taikomas IEC 599–1978 metodas [7]. Izoliacinėje alyvoje IEC iðtirpusiø dujø santykiø kodai pateikti 2 lentelėje, gedimo kodai bei pobūdis – 3 lentelėje.

IEC dujø santykiø kodai nustatomi pagal grieþtai apibrėþtas dujø santykiø reikðmes. Kai dujø santykis virðija nustatytas ribas, kodø reikðmė staigiai pakinta nuo 0 iki 1 (ar iki 2). Faktiðkai, dujø santykio riba gali būti neraiðki (t. y. neraiðkus „fuzzy“ dydis). Todėl, esant ávairioms klaidoms, kodø reikðmė neturėtų staigiai kisti pereinant per ribà. Taip pat esant daugeliui gedimø ið karto, dujos dėl skirtingø gedimø susimaiðo ir sutrikdo skirtingø dujø komponentø santykius. Tai gali būti ávertinta pasitelkus tokias analizės priemones, kaip neraiðkiø aibiø metodà, apraðomà ðiame darbe.

4. NERAIÐKIØ AIBIØ METODAS IÐTIRPUSIØ DUJØ ANALIZEI

Viena svarbiausiø þmogaus patirties galimybiø yra jo sugebėjimas efektyviai veikti naudojant netikslia, nepilnà ir neraiðkià informacijà. Þmogiðkasis vertinimas pranaðsnis, kai daromi kokybiniai sprendimai, bet ne kiekybiniai spėjimai. Neraiðkiø aibiø modeliai gali pakeisti þmogaus daromas þodines (kokybines) iðvadas á skaitines (kiekybines) išraiðkas.

4.1. Neraiðkiø aibiø apibūdinimas

Paprasta aibė gali būti apibūdinama kaip dvinarė funkcija. Ðios aibės elementai gali būti priskirti 1-ai, o kiti likusieji elementai gali būti priskirti 0. Ði funkcija buvo apibendrinta taip, kad reikðmė, priskirta

universalios aibės elementui, esanèiam nustatytaime intervale, rodytø atitinkamà ðio elemento priklausomumo laipsnà aibėje. Didesnės reikðmės reikðtø aukðtesnius priklausomumo aibėje laipsnius. Tokia funkcija vadinama priklausomumo funkcija (μ) ir atitinkama aibė yra neraiðki aibė [8].

Vartojant neraiðkiø aibiø koncepcijà, naudotini kai kurie apibrėþimai:

1. Neraiðkios aibės.

Tarkim, V – netuðeia aibė, o v – elementas, priklausançis tai aibei. A ir B – aibės, priklausançios aibei V . Tuomet elemento v priklausomumas aibei A uþraðomas šitaip:

$$A = \{ (v, \mu_A(v)) / v \in V \}; \quad (1)$$

èia μ_A – neraiðkios aibės priklausomumo funkcija, kurios intervalas $[0, 1]$.

2. Sankirta ir sąjunga.

Tarkim, A ir B – neraiðkios aibės, kuriø priklausomumo funkcijos atitinkamai $\mu_A(v)$ ir $\mu_B(v)$. Elemento v priklausomumà A ir B sankirtai ($C = A \cap B$) ir sąjungai ($D = A \cup B$) priklausomumo funkcijos uþraðomos taip:

$$\mu_C(v) = \min(\mu_A(v), \mu_B(v)), \quad v \in V \quad (2)$$

$$\mu_D(v) = \max(\mu_A(v), \mu_B(v)), \quad v \in V \quad (3)$$

3. Nepriklausomumas aibei.

Nepriklausomumas aibei yra uþraðomas taip:

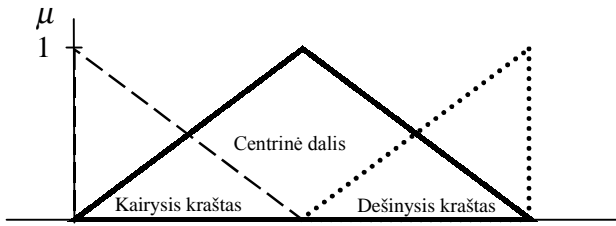
$$\bar{\mu}_A(v) = 1 - \mu_A(v), \quad v \in V; \quad (4)$$

èia $\bar{\mu}_A$ – nepriklausomumo funkcija.

Priklausomumo funkcija dar gali būti vadinama „fuzzy“ aibės pavirðiumi. Daþniausiai yra naudojamos trikampio formos priklausomumo funkcijos. Taèiau pasitaiko ir trapecijos, varpo, s formos funkcijos [8]. Trikampio priklausomumo funkcijos (3 pav.) apskaièiuojamos ðiomis formulėmis:

$$\mu_{\text{kairysis kraðtas}}(v) = \begin{cases} 1 & \text{kai } v \leq c \\ \max\left\{0, 1 + \frac{c-v}{0,5w}\right\} & \text{kitu atveju} \end{cases} \quad (5)$$

$$\mu_{\text{centrinė dalis}}(v) = \begin{cases} \max\left\{0, 1 + \frac{v-c}{0,5w}\right\} & \text{kai } v \leq c \\ \max\left\{0, 1 + \frac{c-v}{0,5w}\right\} & \text{kitu atveju} \end{cases} \quad (6)$$



3 pav. Trikampio formos priklausomumo funkcija (punktirinis trikampis riboja kairįjį kraštą, pajuodintas – centrinę dalį, tačkinis – dešinįjį kraštą)

$$\mu_{\text{dešinysis kraštas}}(v) = \begin{cases} \max\left\{0, 1 + \frac{v-c}{0,5w}\right\} & \text{kai } v \leq c \\ 1 & \text{kitu atveju} \end{cases}; \quad (7)$$

čia c – trikampio centras (trikampio kraštinio atveju – riba, už kurios priklausomumo funkcija visada lygi 1), w – trikampio pagrindo plotas.

4.2. Ištirpusių dujų santykių kodų neraiškios aibės

IDA pagrindiniai diagnostiniai nepinomieji gali būti dujų normos, dujų santykio ribos (R) ar pagrindinės dujos (r).

Ištirpusių dujų analizėje gedimai įvertinami apskaičiuojant ID kiekių santykius, o gedimo pobūdis – atitinkamais santykių kodais. Kodinėje analizėje yra naudojami aprašinės logikos elementai IR bei ARBA. Kiekvienas dujų santykis R gali būti pavaizduotas kaip vektorius:

$$[\text{kodas } 0 (R), \text{kodas } 1 (R), \text{kodas } 2 (R)]. \quad (8)$$

Naudojant neraiškias aibes *kodas 0*, *kodas 1* ir *kodas 2* yra paveriami neraiškios aibių rinkiniu *nulis*, *vienas* ir *du*. Kiekvienas dujų santykis R tuomet gali būti vaizduojamas kaip neraiškios aibių vektorius G_R :

$$G_R = [\mu_{\text{nulis}}(R), \mu_{\text{vienas}}(R), \mu_{\text{du}}(R)]; \quad (9)$$

čia $\mu_{\text{nulis}}(R)$, $\mu_{\text{vienas}}(R)$, $\mu_{\text{du}}(R)$ – neraiškios aibių kodo *nulis*, *vienas*, *du* priklausomumo funkcijos. Priklausomumo funkcijos sudaromos atsižvelgiant á priklausomumo funkcijos tipą (trikampis, trapecija ir pan.) ir gali būti didėjančio $\mu_D(R)$ arba mažėjančio $\mu_M(R)$ pobūdžio, arba jų derinys $\mu_V(R)$.

Remiantis neraiškios aibių teorija, nustatomi neraiškios diagnostikos vektoriai $G(i)$ (čia $i = 1-m$, m – gedimų tipai) pakeičiant loginą IR minimizacijos operacija, o loginą ARBA maksimizacijos operacija. Gaunamos lygtys, kurios normalizuojamos pagal šią formulę:

$$G_{R_n}(i) = \frac{G_R(i)}{\sum_{j=1}^m G(j)}, \quad i = 1-m. \quad (10)$$

Neraiškios aibės gali būti taikomos ne tik ištirpusių dujų santykių kodavimui, bet ir pagrindinių dujų

(r) analizei. Sàvoka *pagrindinės dujos* vartojama nustatyti atskirus gedimų tipus. Pagrindinių dujų ir gedimų tipų ryšys yra apibendrinamas taip:

H_2 – dalinis išlydis; C_2H_4 – aukštos temperatūros gedimas (didelės temperatūros ūluminis gedimas $> 700^\circ C$); C_2H_2 – elektrinio lanko iškrova (didelės energijos elektrinio lanko iškrova).

Kiekvienas gedimas yra nusakomas per dideliu atitinkamų dujų išsiskyrimu virš jo nustatytų ribinių normų. Ribinės normos gali būti nustatytos iš ankstyvesnių tam tikrų tipų transformatorių bandymų [6, 7].

Kiekvienai pagrindinių dujų koncentracijai r taip pat galima sudaryti neraiškios aibių rinkiną *žemas*, *vidutinis* ir *aukštas*, o neraiškios aibės vektorius G_r užrašyti taip:

$$G_r = [\mu_{\text{žemas}}(r), \mu_{\text{vidutinis}}(r), \mu_{\text{aukštas}}(r)]. \quad (11)$$

Pagrindinių dujų neraiškios diagnostikos vektoriai $G_r(i)$ yra randami tokiu pačiu būdu, kaip ir neraiškios IEC metodo diagnostikos vektoriai $G_R(i)$.

4.3. Jungtinis neraiškios diagnostikos vektorius

Remiantis IDA IEC metodu ir neraiškios aibių teorija, suformuotas naujas jungtinis neraiškios IEC kodų – pagrindinių dujų metodas (NKPD), leidžiantis nustatyti daugybinius gedimus transformatoriuje ir kiekybiškai įvertinti kiekvieno gedimo pobūdžio tikimybę. Šio metodo esmė – IEC dujų santykių kodų metodas sujungiamas su pagrindinių dujų metodu. Tuomet jungtinis neraiškios diagnostikos vektorius G yra apibūdinamas šitokia formule:

$$G(i) = w_1 G_{R_n}(i) + w_2 G_{r_n}(i), \quad i = 1-m; \quad (12)$$

čia m – gedimų tipas, w_1 ir w_2 – svorio koeficientai. Šie koeficientai gali būti nustatomi iš praeities patyrimo, bet dažniausiai tariama, jog jie lygūs 0,5. Vektorius $G(i)$ normalizuojamas, siekiant prilyginti visą neraiškios aibių vektorius vienetai.

5. NERAIŠKIOS AIBIŲ TAIKYMAS TRANSFORMATORIŲ PRADINIŲ GEDIMŲ PROGNOZEI

Remiantis IEC 599–1978 metodu (2 lentelė) TR gedimai gali būti atpažinti trijų dujų IEC santykių kodais: $R_1 = C_2H_2 / C_2H_4$, $R_2 = CH_4 / H_2$ ir $R_3 = C_2H_4 / C_2H_6$ ir gali būti koduojami kaip 0, 1 ir 2 ávairiems santykių intervalams. Kiekvieno dujų santykio intervalo ir atitinkamo IEC kodo ryšiams aiškiai parodyti 2 lentelė galima perdaryti (4 lentelė).

Kiekvienas gedimas transformatoriuje gali būti ávertintas neraiškios aibių vektoriumi G . Todėl skirtingi TR gedimai (3 lentelė) gali būti aprašyti šiomis lygtimis:

$$\begin{aligned} G_R(1) &= \min[\mu_{\text{nulis}}(R_1), \mu_{\text{nulis}}(R_2), \mu_{\text{nulis}}(R_3)]; \\ G_R(2) &= \min[\mu_{\text{nulis}}(R_1), \mu_{\text{vienas}}(R_2), \mu_{\text{nulis}}(R_3)]; \\ G_R(3) &= \min[\mu_{\text{vienas}}(R_1), \mu_{\text{vienas}}(R_2), \mu_{\text{nulis}}(R_3)]; \end{aligned}$$

4 lentelë. Perdaryti IEC kodai

IEC dujø santykiai	Kodas 0	Kodas 1	Kodas 2
$R_1 = C_2H_2/C_2H_4$	< 0,1	0,1–3	> 3
$R_2 = CH_4/H_2$	0,1–1	< 0,1	> 1
$R_3 = C_2H_4/C_2H_6$	< 1	1–3	> 3

$$G_R(4) = \max\{\min[\mu_{vienas}(R_1), \mu_{nulis}(R_2), \mu_{vienas}(R_3)]; \min[\mu_{vienas}(R_1), \mu_{nulis}(R_2), \mu_{du}(R_3)]; \min[\mu_{du}(R_1), \mu_{nulis}(R_2), \mu_{vienas}(R_3)]; \min[\mu_{du}(R_1), \mu_{nulis}(R_2), m_{du}(R_3)]\};$$

$$G_R(5) = \min[\mu_{vienas}(R_1), \mu_{nulis}(R_2), \mu_{du}(R_3)];$$

$$G_R(6) = \min[\mu_{nulis}(R_1), \mu_{nulis}(R_2), \mu_{vienas}(R_3)];$$

$$G_R(7) = \min[\mu_{nulis}(R_1), m_{du}(R_2), m_{nulis}(R_3)];$$

$$G_R(8) = \min[\mu_{nulis}(R_1), \mu_{du}(R_2), \mu_{vienas}(R_3)];$$

$$G_R(9) = \min[\mu_{nulis}(R_1), \mu_{du}(R_2), \mu_{du}(R_3)].$$

Priklausomumo funkcijoms $\mu(R)$ sudaryti naudojamos didëjanti $\mu_D(R)$ ir maþëjanti $\mu_M(R)$ pusiau Koši pasiskirstymo funkcijos:

$$\mu_D(R) = \begin{cases} 1, & \text{kai } R \geq X \\ \frac{1}{1 + \left(\frac{X-R}{x}\right)^2}, & \text{kitu atveju} \end{cases} \quad (13)$$

$$\mu_M(R) = \begin{cases} 1, & \text{kai } R \leq X \\ \frac{1}{1 + \left(\frac{R-X}{x}\right)^2}, & \text{kitu atveju} \end{cases} \quad (14)$$

ëia X ir x – atitinkamai dujø santykiø ir pasiskirstymo parametrai.

$G_R(1) - G_R(9)$ lygtys yra normalizuojamos remiantis (10) formule:

$$G_{Rn}(i) = \frac{G_R(i)}{\sum_{j=1}^8 G_R(j)}, \quad i = 1-9.$$

Pagrindiniø dujø (r) skaiëiavimai atliekami lygiai tokia pat seka, kaip ir IEC kodams.

Tuomet jungtinis neraiðkios diagnostikos vektorius G apskaiëiuojamas remiantis (12) formule:

$$G(i) = w_1 G_{Rn}(i) + w_2 G_{rn}(i), \quad i = 1-9;$$

ëia w_1 ir w_2 – svorio koeficientai, kurie lygûs 0,5.

6. TRANSFORMATORIØ GEDIMØ PROGNOZËS REZULTATAI

Prognozavimui surinkti keturiø 110–330 kV galios transformatoriø, kuriø leistinas dujø kiekis alyvoje þenkliai virðytas ir kuriems buvo nustatyti tam tikri gedimai, degiøjø dujø duomenys (5 lentelë).

5 lentelë. Tiriamø transformatoriø iðtirpusiø dujø koncentracija [ppm*]

TR Nr.	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆
1	75,98	20,35	8,36	105,38	0,0
2	315,19	175,35	233,63	41,11	1,46
3	131,71	204,21	284,98	132,29	0,07
4	472,60	40,58	99,91	8,18	797,20

* ppm – 1 µl/l.

Tiriamø transformatoriø gedimø pobûdþiø nustatymo rezultatai, gauti remiantis IEC ir NKPD metodais, pateikti 6 lentelëje.

Remiantis gautais rezultatais nustatyta, kad prognozuojant gedimus tradiciniu IEC dujø santykiø kodø ir jungtiniu NKPD metodais TR gedimø pobûdis daugeliu atvejø sutampa. Taëiau NKPD metodu gedimo pobûdá galima nustatyti tiksliau.

Kai kuriais atvejais gedimai gali bûti tik ankstyvoje stadijoje, kai iðtirpusiø dujø koncentracija virðija leistinà normà, bet po kiek laiko dujø reikðmë stabilizuojasi arba jie vyksta tik retkarëiais, kai neiðskiria pakankamai dujø ir gedimas nėra toks ryðkus. Pavyzdþiui, pirmojo TR atveju tradiciniu IEC metodu nustatyta, jog yra natûralus senëjimas, o jungtinis NKPD metodas parodë, jog gali bûti ne tik natûralus senëjimas, bet ir þemos temperatûros ðiluminis gedimas (< 300°C). TR buvo remontuojamas ir nustatyta, jog ðiluminio gedimo prieþastis buvo aukðta bako temperatûra ir alyvos pratekëjimas. Remonto metu priverþtas riebokðlis ir varinë smeigë. TR suremontuotas ir ájungtas tolesnei eksploatacijai. Dël kodø neatitikimo antrojo TR gedimai negalëjo bûti diagnozuoti IEC metodu, taëiau NKPD metodu nustatytas aukðtos temperatûros ðiluminis gedimas. Apþiuoros metu nustatyta, jog ðio gedimo prieþastis dujø iðsiskyrimas alyvoje dël blogø kontaktiniø sujungimø. Atlikus remontà, TR ájungtas tolimesniai darbui. Treëiajam TR IEC kodø metodu diagnozuotas þemos temperatûros ðiluminis gedimas (< 150°C). Tuo tarpu NKPD metodu nustatytas vidutinës temperatûros ðiluminis gedimas (300–700°C). Ketvirtajam TR tradiciniu IEC metodu nustatytas maþos energijos dalinis iðlydis (DI), o jungtiniu NKPD metodu – ne tik maþos energijos DI, bet ir þemos bei aukðtos temperatûros ðiluminiai gedimai. Ðiems gedimams neraiðkiø aibiø vektorius kinta nuo 0 iki 0,2101. Iðardþius TR rasta paþeista popierinë izoliacija ir nustatyta, jog perkaitimai galëjo atsirasti dël árenginio perkrovø.

7. IÐVADOS

1. Galios transformatoriø gedimams prognozuoti galima taikyti neraiðkø IEC kodø – pagrindiniø dujø metodà, kuriuo gauti rezultatai realiai atitinka TR gedimus.

6 lentelė. Gedimo pobūdių nustatymas tradiciniu IEC ir jungtiniu NKPD metodais

TR Nr.	Tradicinis IEC metodas		Neraiškus IEC kodø – pagrindiniø dujø metodas (NKPD)	
	IEC kodas	Gedimo pobūdis	Neraiškus gedimo vektorius	Gedimo pobūdis
1	000	Natūralus senėjimas (Nėra gedimo)	$G(1) = 0,59$ $G(2) = 0,05$ $G(3) = 0,00$ $G(4) = 0,01$ $G(5) = 0,00$ $G(6) = 0,00$ $G(7) = 0,25$ $G(8) = 0,01$ $G(9) = 0,09$	Natūralus senėjimas Mažos energijos dalinis išlydis Didelės energijos dalinis išlydis Mažos energijos elektros lanko iškrova Didelės energijos elektros lanko iškrova Pėmos temperatūros šiluminis gedimas (< 150°C) Pėmos temperatūros šiluminis gedimas (150–300°C) Vidutinės temperatūros šiluminis gedimas (300–700°C) Aukštos temperatūros šiluminis gedimas (> 700°C)
2	002	Nėra tokio kodo	$G(1) = 0,100$ $G(2) = 0,1232$ $G(3) = 0,0005$ $G(4) = 0,09$ $G(5) = 0,00$ $G(6) = 0,00$ $G(7) = 0,097$ $G(8) = 0,00$ $G(9) = 0,589$	Natūralus senėjimas Mažos energijos dalinis išlydis Didelės energijos dalinis išlydis Mažos energijos elektros lanko iškrova Didelės energijos elektros lanko iškrova Pėmos temperatūros šiluminis gedimas (< 150°C) Pėmos temperatūros šiluminis gedimas (150–300°C) Vidutinės temperatūros šiluminis gedimas (300–700°C) Aukštos temperatūros šiluminis gedimas (> 700°C)
3	001	Pėmos temperatūros šiluminis gedimas (< 150°C)	$G(1) = 0,093$ $G(2) = 0,1016$ $G(3) = 0,000$ $G(4) = 0,056$ $G(5) = 0,000$ $G(6) = 0,0937$ $G(7) = 0,0866$ $G(8) = 0,4813$ $G(9) = 0,0896$	Natūralus senėjimas Mažos energijos dalinis išlydis Didelės energijos dalinis išlydis Mažos energijos elektros lanko iškrova Didelės energijos elektros lanko iškrova Pėmos temperatūros šiluminis gedimas (< 150°C) Pėmos temperatūros šiluminis gedimas (150–300°C) Vidutinės temperatūros šiluminis gedimas (300–700°C) Aukštos temperatūros šiluminis gedimas (> 700°C)
4	202	Mažos energijos išlydis	$G(1) = 0,085$ $G(2) = 0,2101$ $G(3) = 0,125$ $G(4) = 0,1595$ $G(5) = 0,000$ $G(6) = 0,000$ $G(7) = 0,2101$ $G(8) = 0,000$ $G(9) = 0,2101$	Natūralus senėjimas Mažos energijos dalinis išlydis Didelės energijos dalinis išlydis Mažos energijos elektros lanko iškrova Didelės energijos elektros lanko iškrova Pėmos temperatūros šiluminis gedimas (< 150°C) Pėmos temperatūros šiluminis gedimas (150–300°C) Vidutinės temperatūros šiluminis gedimas (300–700°C) Aukštos temperatūros šiluminis gedimas (> 700°C)

2. Jungtinis neraiškio IEC kodø – pagrindiniø dujø (NKPD) metodas, kaip ir tradicinis IEC metodas, leidžia prognozuoti sunkesnius transformatoriø gedimus. Taėiau NKPD metodu galima gauti detalesnė ir tikslesnė informaciją apie gedimus, vykstanėius TR viduje.

3. Tradiciniu IEC 599–1978 metodu nustatomas tik vienas vyraujantis gedimas arba gedimo pobūdis negali būti nusakomas dėl gedimo kodø nebuvimo, taikant NKPD metodą gaunama išsamesnė gedimo charakteristika.

4. Nustatyta, jog kuo didesnis neraiðkiø aibiø vektorius, tuo aktyvesnis, sunkesnis ir labiau vyraujantis yra gedimas.

5. NKPD metodas gali bûti taikomas ir kitø aukðtos átampos árenginiø, kuriuose yra medþiagø, avarijos metu galinëiø iðskirti dujas, gedimams prognozuoti.

6. Jungtiniu NKPD metodu gauti rezultatai leidþia optimizuoti TR ir kitø árenginiø darbo grafikà ir pasiekti ilgesnà eksploatacijos trukmà.

Gauta 2005 02 02

Literatûra

- Lai L. L. Intelligent System Applications in Power Engineering // Evolutionary Programming and Neural Networks / City University. London. UK, 1998. P. 197–207.
- Su Q., Mi C., Lai L. L., Austin P. A Fuzzy Dissolved Gas Analysis Method for the Diagnosis of Multiple Incipient Faults in a Transformer // IEEE Transactions on Power Systems. May 2000. Vol. 15. No. 2. P. 593–598.
- Lin C. E., Ling J. M., Huang C. L. An Expert System for Transformer Fault Diagnosis Using Dissolved Gas Analysis // IEEE Transactions on Power Delivery. January 1993. Vol. 8. No. 1. P. 231–238.
- Tomsovic K., Tapper M., Ingvarsson T. A fuzzy information approach to interpreting different transformer diagnostic methods // IEEE Transactions on Power Delivery. July 1993. Vol. 8. No. 3. P. 1638–1646.
- Zhang Y., Ding X., Liu Y., Griffin P. J. An Artificial Neural Network Approach To Transformer Fault Diagnosis // IEEE Transactions on Power Delivery. October. 1996. Vol. 11. No. 4. P. 1836.
- AB „Lietuvos energija“. Galios transformatoriuose ir ávaduose atsirandanø defektø diagnostikos (pagal izoliacineje alyvoje iðtirpusiø dujø chromatografinës analizës rezultatus) metodiniai nurodymai. Vilnius, 2002. P. 50.
- Mineraline alyva impregnuotos elektrinës árangos eksploatavimas. Iðtirpusiø ir laisvøjø dujø analizës aiðkinimo vadovas (IEC 60599:1999). Lietuvos standartas LST EN 60599.
- Chen G., Pham T. T. Introduction to Fuzzy Sets, Fuzzy Logical, and Fuzzy Control Systems. New York: CRC Press, 2001. P. 316.

Algimantas Navickas, Birutë Linkevièiutë

FORECAST OF POWER TRANSFORMER FAILURES USING FUZZY SETS THEORY FOR DISSOLVED GAS ANALYSIS

Summary

The dissolved gas analysis methods are reviewed. A combined fuzzy IEC code — key gas method for determining the nature of transformer failures is explored on the basis of the fuzzy sets theory. Only a single or a dominant failure can be determined by the conventional IEC code method. A combined fuzzy IEC code – key gas method allows determining, multiple failures in a transformer and quantitatively indicate the possibility of each failure. The obtained results coincide with the real transformer failures.

Key words: power transformer, dissolved gas analysis, fuzzy set, membership function, failure

Åeüæi áí ðàí í àæøëàñ, Åeðøà Èëíëÿæ=þøà

Í ðÍ ÁÍ Í ÇÈÐÍ ÁÁÍ ÈÁ Í ÁÈÑÍ ÐÁÁÍ Í ÑÒÁÈ ÑÈÈÍ ÁÚÓ ØÐÁÍ ÑÓÍ ÐÌ ÁÒÍ ÐÍ Á Ñ ÈÑÍ Í ÈÚÇÍ ÁÁÍ ÈÁÍ ØÁÍ ÐÈÈ Í Á×ÁÐÈÈÓ Í Í Í ÅÄÑÒÁ ÅÈß ÁÍ ÁÈÈÇÁ ÐÁÑÒÁÍ ÐÈÁØÈÓÑß ÁÄÇÍ Á

Ðàçþìà

Ðàññì íððáí ú ì àòí àú áí àèèçà ðàñòáí ðèáøèõñÿ ääçíá. Ñ èñí í èüçí ááí èáí òáí ðèè í á+àðèèò í í í æáñòá í òáí áí í í ðèì áí áí èá í áúááèí áí í í áí ì àòí áá í á+àðèèò IEC èí áí á – í ñí í áí úò ääçíá äèÿ í í ðáááèáí èÿ òáðáèòáðá í áèñí ðááí í ñòáè òðáí ñóí ðì áòí ðí á. Óñòáí í áèáí í, +òí òðááèòèí í í úé ì àòí á IEC èí áí á ñí í òí í òáí éé ääçíá í í ðáááèÿáò òí èüèí áí í èí èðóþúóþ í áèñí ðááí í ñòú, òí ááà èáè í áúááèí áí í úé ì àòí á í á+àðèèò IEC èí áí á – í ñí í áí úò ääçíá í í çáí èÿáò +èñèáí í í í òáí èòú ááðí ÿòí í ñòú èáæáí é í áèñí ðááí í ñòè è òñòáí í áèòú ì í í æáñòááí í úá í áèñí ðááí í ñòè òðáí ñóí ðì áòí ðí á. Í í èó+áí í úá ðáçøèüòáòú ñí í òááòñòáóþò ðááèüí úí í áèñí ðááí í ñòÿì òðáí ñóí ðì áòí ðí á.

Èëþ=ááúá ñèíáà: ñèèí áí é òðáí ñóí ðì áòí ð, áí àèèç ðáñòáí ðèáøèõñÿ ääçíá, òáí ðèÿ í á+àðèèò í í í æáñòá, óóí èøèÿ çáàèñèì í ñòè, í áèñí ðááí í ñòú