

Elektros įrenginių gedimų įvertinimo ištirpusių dujų analizės metodu efektyvumo tyrimas

Birutė Linkevičiūtė,

Algimantas Navickas

*Kauno technologijos universitetas,
Elektros sistemos katedra,
Studentų g. 48, LT-51367 Kaunas,
el. paštas: birute.linkeviciute@stud.ktu.lt*

Darbe apžvelgti elektros įrenginių gedimų įvertinimui taikomi ištirpusių dujų analizės (IDA) metodai bei papildomi rodikliai, nusakantys elektros įrenginių būklę. Remiantis tradiciniais IDA metodais įvertintos galios transformatorių galimo gedimo prognozavimo galimybės, IDA metodų efektyvumas. Nustatyta, jog elektros įrenginių gedimų analizė yra efektyvesnė ir tikslesnė naudojant keletą IDA metodų kompleksiskai arba intelektinius metodus.

Raktažodžiai: elektros įrenginys, ištirpusių dujų analizė, gedimas, efektyvumas, intelektiniai metodai

1. ĮVADAS

Elektros įrenginių techninės būklės įvertinimas bei defektų prognozė yra aktualus ir gana sudėtingas uždavinys. Pažeidžiamiausi elektros sistemų įrenginiai – aukštos įtampos įrenginiai. Šių įrenginių būklė turi didžiausią įtaką pastotės ir viso elektros perdavimo tinklo patikimumui. Srovės, įtampos transformatorių (TR), viršįtampių ribotuvų bei iškroviklių greičiausiai gendantis elementas – izoliacija. ZTZ „Service“ (Ukraina) atlikta avarijų per metus analizė parodė, jog dėl izoliacijos konstrukcijų pažeidimo įvyksta apie 30% avarijų. Pagrindinis dėmesys ir dauguma tyrimų, skirtų įrenginių patikimumui įvertinti, yra nukreipti į elektros įrenginių komponentų (srovėlaidžio, izoliacijos, magnetolaidžio, kontaktų sistemos ir kt.) sąveikos, veikiant įtampai ir srovei bei aplinkai, kokybinių charakteristikų nustatymą. Kokybinės elektros įrenginių izoliacijos charakteristikos šiuo metu vertinamos įvairiais metodais, kurių rezultatai nėra tikslūs arba gaunama informacija yra gana vienpusiška. Šio uždavinio sprendimui siūloma sukurti elektros įrenginių kokybinių patikimumo charakteristikų nustatymo metodą, kompleksiskai taikant ir papildant esamus metodus.

Šio darbo tikslas – atlikti elektros įrenginių galimų gedimų įvertinimui taikomų ištirpusių dujų analizės (IDA) metodų ir papildomų elektros įrenginių kokybinių rodiklių analizę, įvertinti galimo gedimo prognozavimo IDA metodais efektyvumą bei išnagrinėti intelektinių metodų panaudojimo tolesniems kompleksiniams tyrimams, susijusiems su elektros įrenginių gedimų pobūdžio nustatymu, galimybės.

2. DUJŲ IŠSISKYRIMO PRIEŽASTYS IR JŲ ANALIZĖS METODAI

Dujos, susidariusios dėl gedimų elektros įrenginiuose, dažniausiai atsiranda dėl alyvos bei kitų izoliacinių medžiagų (pvz., celiuliozės ir popieriaus) degradacijos. Teoriškai, jei gedimas vystosi ar jau visiškai aktyvus, atskirų ištirpusių dujų koncentracija, dujingumo santykis, visų degių dujų ir celiuliozės degradacija ženkliai padidėja. Remiantis alyvoje ištirpusių dujų kontrolės metodais, pagal alyvoje ištirpusių dujų kiekius, nusakomi galimi gedimai. Ištirpusios dujos gali kisti priklausomai nuo gedimo kilmės bei gedimo laipsnio. Išskiriami trys pagrindiniai gedimų procesai: perkaitimas, dalinis išlydis ir elektros lanko išlydis. Daliniai bei elektros lanko išlydziai atsiranda dėl elektrinių gedimų, tuo tarpu įkaitusios vietos ir perkaitimas yra šiluminis gedimas. Taikant tradicinius IDA metodus, ištirpusių dujų koncentracijos turi būti sulygintos su „etaloninių“ koncentracijų reikšmėmis, kurios nurodomos kaip tipinės dujų koncentracijų reikšmės [1]. Jei visų ištirpusių dujų koncentracijos yra mažesnės už šias tipines reikšmes, tai įrenginys laikomas veikiančiu be gedimų. Jei nors vienos iš ištirpusių dujų koncentracijos reikšmė didesnė už leistinas – atliekama elektros įrenginio galimo gedimo analizė gedimų diagnostikos metodais.

2.1. Pagrindinių dujų metodas

Sąvoka „pagrindinės dujos“ (angl. “key gas”) – tai dažniausiai išsiskiriančios didžiausios koncentracijos dujos. Jos naudojamos identifikuoti tam tikro pobūdžio gedimus [2]. Išsiskiriančių pagrindinių dujų ir elektros įrenginių gedimų pobūdžio ryšys matyti 1 lentelėje.

1 lentelė. Gedimo pobūdžio įvertinimas pagal išsiskiriančių dujų kiekius

Galimas gedimo pobūdis	Išsiskyrusių dujų santykinis kiekis %					
	CO	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂
Dalinis išlydis (DI)	-	82	13	1	1	-
Gedimas esant žemai / aukštai temperatūrai alyvoje (Š1/Š3)	-	2	16	19	63	-
Elektros lanko išlydis (EI)	-	60	5	2	3	30
Popierinės izoliacijos gedimas (Š)	92	-	-	-	-	-

Sugedus elektros įrenginiui, dažniausiai išsiskiria dešimties rūšių dujos: vandenilis (H₂), acetilenas (C₂H₂), metanas (CH₄), etilenas (C₂H₄), etanas (C₂H₆), anglies oksidas (CO), anglies dioksidas (CO₂), deguonis (O₂) ir azotas (N₂). Gedimą apibūdina šių dujų ribinės vertės viršijimas. Kadangi šis metodas nepateikia skaitinės gedimo ir dujų kiekio koreliacijos, diagnozė labiausiai priklauso nuo eksperto patirties. Metodas nėra sudėtingas, tačiau reikalauja nemažos darbo patirties.

2.2. IEEE C57.104-1991 metodas

Šio metodo esmė – įvertinti elektros įrenginio eksploatacijos sąlygas pagal tam tikros ištirpusių dujų rūšies vyravimą, o gedimo pavojingumą – pagal dujų koncentracijos didėjimą. Kuo didesnė dujų koncentracija, tuo labiau vyraujanti ji yra ir pagal vyraujančias dujas yra nusakomi šie gedimai: H₂ – dalinis išlydis (DI), CO ir C₂H₄ – perkaitimas (Š), C₂H₂ ir H₂ – elektros lanko išlydis (EI).

2.3. Ištirpusių dujų santykių metodai

Ištirpusių dujų santykių metodų esmė – naudojami įvairūs dujų santykiai tarp dujų kiekių. Atsirandančių gedimų pobūdis ir tipas nustatomas pagal šių dujų koncentracijų santykius: H₂, CH₄, C₂H₂, C₂H₄ ir C₂H₆. Dažniausiai yra taikomi šie ištirpusių dujų santykių metodai: Rogerso, Doernenbergo, IEC 60599:1999, Duvalio trikampio, GE. Šie metodai yra aprašyti LST EN 60599 bei IEEE Std C57.104-1991 standartuose [2, 3]. Dujų santykiai nustatyti pagal dujų maksimaliąsias vertes. Santykių intervalai priskiriami skirtingiems kodams, apibrėžiantiems gedimų tipus.

2 lentelė. Gedimo pobūdžio įvertinimas Dornenbergo metodu

Gedimo pobūdis	CH ₄ /H ₂	C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄	C ₂ H ₆ /C ₂ H ₂	C ₂ H ₂ /CH ₄
Perkaitimas (Š)	>1	<0,75	<0,4	>0,3
Dalinis išlydis (DI)	<0,1	NŽ*	>0,4	<0,3
Elektros lanko išlydis (EI)	1–0,1	>0,75	<0,4	>0,3

* NŽ – vertė nedidelė.

3 lentelė. Rogerso metodo ištirpusių dujų santykių kodų kombinacijos

Santykio dydis	Santykio dydis ir kodas			
	<0,1	0,1–1	1–3	>3
CH ₄ /H ₂	5	0	1	2
C ₂ H ₆ /CH ₄	0	0	1	1
C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆	0	0	1	2
C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄	0	1	1	2

4 lentelė. Galimas gedimo pobūdis pagal Rogerso ištirpusių dujų santykių kodų kombinaciją

Galimos gedimų priežastys	Santykių kodai ir pasekmės			
	CH ₄ /H ₂	C ₂ H ₆ /CH ₄	C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆	C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄
Normalu (N)	0	0	0	0
Daliniai išlydžiai (DI)	5	0	0	0
Perkaitimas <150°C (Š)	1/2	0	0	0
Perkaitimas 150–200°C (Š)	1/2	1	0	0
Perkaitimas 200–300°C (Š)	0	1	0	0
Pagrindinio laidininko perkaitimas (Š)	0	0	1	0
Apvijų sukūrinės srovės	1	0	1	0
Magnetolaidžio ir bako sukūrinės srovės arba jungčių perkaitimas	1	0	2	0
Kibirkščiavimas be perdengimo	0	0	0	1
Daliniai išlydžiai su slystančiąja iškrova (DI)	5	0	0	1/2
Pastovus kibirkščiavimas (EI)	0	0	2	2
Elektros lanko išlydis su perdengimais (EI)	0	0	1/2	1/2

Vienas ankstyviausiai sukurtų metodų – **Doernenbergo metodas**, kuris naudoja keturis ištirpusių dujų santykius CH₄/H₂, C₂H₂/C₂H₄, C₂H₆/C₂H₂, C₂H₂/CH₄ alyvoje, o gedimo charakteristika nustatoma remiantis 2 lentele.

Remiantis šiuo metodu gedimo pobūdis nustatomas tik tuo atveju, jei tenkinamos visos keturios sąlygos, t. y. jei ištirpusių dujų santykiai mažesni ar didesni už 2 lentelėje nurodytas reikšmes.

Rogerso metodas remiasi alyvoje keturiais ištirpusių dujų santykiais (CH_4/H_2 , $\text{C}_2\text{H}_6/\text{CH}_4$, $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$ ir $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$). Pagal šiuos dujų santykius nusakomas tikslesnis gedimo pobūdis, kadangi papildomai yra naudojama dujų santykių kodų lentelė (3 lentelė). Gedimo pobūdis atitinkamai nustatomas iš 4 lentelės, kai santykio kodo kombinacija atitinka galimo gedimo priežastį ir pasekmę.

IEC 60599:1999 metodas naudoja tris ištirpusių dujų alyvoje santykius: $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$, CH_4/H_2 ir $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$. Šis metodas, panašiai kaip ir Rogerso metodas, turi kodų lentelę, pagal kurią nustatomas gedimo tipas. Dujų santykių kodų kombinacijos ir galimi gedimo pobūdžiai pateikti 5 lentelėje.

5 lentelė. IEC ištirpusių dujų santykių kodų kombinacijos ir gedimo charakteristikos

Santykio dydis	Santykio dydis ir kodas			
	<0,1	0,1–1	1–3	>3
$\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$	0	1	1	2
CH_4/H_2	1	0	2	2
$\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$	0	0	1	2
Galimas gedimas	Santykių kodai			
	$\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$	CH_4/H_2	$\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$	
Normalu (N)	0	0	0	
Dalinis išlydis mažos energijos (DIM)	0	1	0	
Dalinis išlydis didelės energijos (DID)	1	1	0	
Mažos energijos elektros lanko išlydis (EIM)	1/2	0	1/2	
Didelės energijos elektros lanko išlydis (EID)	1	0	2	
Perkaitimas (< 150°C) (Š)	0	0	1	
Perkaitimas (150–300°C) (Š1)	0	2	0	
Perkaitimas (300–700°C) (Š2)	0	2	1	
Perkaitimas (>700°C) (Š3)	0	2	2	

Duvalio trikampis. Šiuo metodu apskaičiuojama trijų dujų suma $\Sigma = \text{C}_2\text{H}_2 + \text{CH}_4 + \text{C}_2\text{H}_4$ ir procentinė kiekvienių dujų išraiška nuo bendros jų sumos. Gedimo pobūdžio identifikavimui naudojama trimatė koordinačių sistema, pagal kurią galima nustatyti tokius gedimus: EID – elektros lanko išlydis didelės energijos, EIM – elektros lanko išlydis mažos energijos, DI – daliniai išlydžiai, Š1 – perkaitimas (temperatūra $T < 300^\circ\text{C}$), Š2 – perkaitimas (temperatūra $300^\circ < T < 700^\circ\text{C}$), Š3 – perkaitimas (temperatūra $T > 700^\circ\text{C}$).

GE metodas. Gedimo pobūdžiui nustatyti GE metodu naudojami du alyvoje ištirpusių dujų santykiai: $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$ ir $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$ ir koordinačių sistema, kuria remiantis nustatomi tokie gedimo pobūdžiai: Na – nenusakoma; EI – elektros lanko išlydis; Š1 – perkaitimas (<300°C); Š3 – perkaitimas (>700°C).

Ištirpusių dujų analizėje išsiskyrusios dujos yra naudojamos apibrėžti kiekvieną santykį ir jo priskirtas ri-

bas. Kodai išdėstomi pagal reikšmes, gautas kiekvienam santykiui, ir pagal tai atitinka apibūdinamą gedimą.

IDA metodų įdiegimas reikalauja kelių pagrindinių dujų santykių apskaičiavimo. Gedimo diagnozė baigiamą įvertinus šių santykių reikšmę esant kelioms iš anksto nustatytoms elektros įrenginių būklės sąlygoms.

3. ELEKTROS ĮRENGINIŲ GEDIMŲ ĮVERTINIMAS ANALIZUOJANT ĮVAIRIUS IZOLIACIJOS KOKYBINIUS RODIKLIUS

Aukštosios įtampos elektros įrenginių būklei įvertinti yra matuojami ne tik ištirpusių dujų kiekiai, bet ir kiti įvairūs kokybiniai parametrai: dalinių išlydžių (DI) lygis, dielektrinių nuostolių kampas $\text{tg}\delta$, izoliacijos varžos dydis, drėgmės kiekis ir pan. Įrenginio būklei įvertinti išmatuoti parametrai yra lyginami su normuotomis leistinosiomis vertėmis, nurodytomis standartuose, gamintojo instrukcijose ar norminiuose dokumentuose [1]. Toks matavimo rezultatų sulyginimas su normuotomis vertėmis leidžia įvertinti kritinį vieno ar kelių parametru lygį.

DI matuojami specialiais zondais indukciniu, talpiniu ar ultragarsiniu principu netiesioginėje schemoje. Aukštos įtampos įrenginių DI lygio kontrolės periodiškumas turėtų priklausyti nuo izoliacijos būklės. Pradiniame įrenginio eksploatavimo etape pakanka DI lygį matuoti vieną kartą per metus (bet tik esant analogiškomis įrenginio eksploatavimo sąlygoms). Įrenginiams, kurių pusė eksploatacinio ištekliaus išnaudota, tikslinga dažnesnė DI parametru kontrolė. Kartu būtina užregistruoti ir tinklo bei aplinkos veiksnius, nes jie turi įtakos DI dydžiui bei matavimo tikslumui. Registruotini ne tik aplinkos (temperatūra, debesuotumas), bet ir elektriniai parametrai: elektros įrenginio apkrova, pirminė ir antrinė įtampos, vidinė darbo temperatūra. Registruojant DI galima nustatyti, kurioje darbo zonoje yra įrenginio izoliacija. Eksploataciniai kokybiškos izoliacijos DI, esant maksimaliai darbo įtampai, alyvos ir popieriaus izoliacijai yra iki 10–15 pC, kietai izoliacijai iki 50 pC. Įrenginiams, kuriuose registruojami didesni daliniai išlydžiai, rekomenduojama detalesnė izoliacijos kontrolė.

Apie izoliacijos būklę galima spręsti ir atlikus apvijų izoliacijos dielektrinių nuostolių kampo $\text{tg}\delta$ matavimus. Izoliacijos $\text{tg}\delta$ vertė, prieš įrenginio eksploatavimą arba suremontavus, perskaičiuota esant pradinių verčių temperatūrai, įvertinus alyvos $\text{tg}\delta$ įtaką, gali skirtis ne daugiau kaip 50% pradinės $\text{tg}\delta$ vertės. Jeigu, esant $+20^\circ\text{C}$ temperatūrai, išmatuota izoliacijos $\text{tg}\delta$ vertė mažesnė kaip 1%, izoliacijos būklė yra patenkinama. Eksploatuojant $\text{tg}\delta$ matuojamas, kai gaunami nepatenkinami alyvos bandymų arba chromatografinės ištirpusių dujų analizės rezultatai.

Siekiant sužinoti izoliacijos drėgnį, ieškoma absorbcijos koeficiento K_{abs} . Praktiniu būdu nustatyta, jog jei $K_{\text{abs}} > 1,3$, tai izoliacijos drėgnumo lygis yra leistinas ir tolesnis darbas yra galimas. Jei $K_{\text{abs}} < 1,3$, tai izoliacija labai drėgna ir įrenginio darbas neleistinas. Jei K_{abs}

mažas, tai izoliacija nebūtinai yra drėgna. To priežastis gali būti tarša arba vietinių defektų atsiradimas izoliacijoje.

Apvijos izoliacijos varža (R_{iz}), prieš eksploatuojant ir suremontavus įrenginį, turi būti ne mažesnė kaip 50% pradinės vertės. Papildomai R_{iz} matuojama tokiose izoliacijos zonose: tarp aukštosios įtampos apvijos korpuso atžvilgiu (A–K), tarp žemosios įtampos apvijos korpuso atžvilgiu (Ž–K) bei tarp aukštosios įtampos apvijos žemosios atžvilgiu (A–Ž). Izoliacijos varžos matavimai atliekami, kai nepatenkinami alyvos bandymų arba alyvoje ištirpusių dujų chromatografinės analizės rezultatai. Kai įtampa yra kintama, tuomet matuojamas izoliacijos talpumas (C_{iz}). C_{iz} matuojama esant dviem dažniams 2 ir 50 Hz. Jei $(C_2/C_{50}) > 1/3$, tai izoliacija neleistinai drėgna. Ir kuo vienodesnės C_2 ir C_{50} reikšmės, tuo izoliacija kokybiškesnė.

Izoliacinės alyvos charakteristikos įvertinamos ir remiantis alyvoje ištirpusių dujų chromatografinė arba alyvos trumpąja analize. Alyvos trumpoji analizė apima izoliacinės alyvos pramušimo įtampos, rūgštingumo, pliūpsnio temperatūros, vandens kiekio matavimus ir kt. Galios TR alyvos trumposios analizės charakteristikos ir jų nustatymo periodiškumas pateiktas 6 lentelėje.

6 lentelė. 110–330 kV galios transformatorių eksploatacinės kokybinės charakteristikų ribos ir jų nustatymo periodiškumas (esant +20°C temperatūrai)

Kokybės charakteristikos	Eksploatacinė riba	Kokybės charakteristikų nustatymo periodiškumas
Vandens kiekis alyvoje	H-25, NH-30 g/t	330 kV – kartą per 2 m. 110 kV – kartą per 4 m. arba kompleksiskai bandant
Alyvos dielektrinis atsparumas U_{pr}	Ne mažiau kaip 35/45 kV	330 kV – kartą per 2 m. 110 kV – kartą per 4 m. arba kompleksiskai bandant
Mechaninės priemonės alyvoje	Švaros klasė $\leq 13/12$	330 kV – kartą per 2 m. 110 kV – kartą per 4 m. arba kompleksiskai bandant
Rūgštingumas mgKOH/g	Ne daugiau kaip 0,25	330 kV – kartą per 2 m. 110 kV – kartą per 4 m. arba kompleksiskai bandant
Alyvos pliūpsnio temperatūra	Ne mažiau kaip +125°C	330 kV – kartą per 2 m. 110 kV – kartą per 4 m. arba kompleksiskai bandant
Furaninių junginių kiekio alyvoje nustatymas	0,00015%	110–330 kV – 1 kartą per 12 metų, o po 24 – kartą per 4 metus arba kai izoliacinėje alyvoje padidėja ištirpusių CO ir CO ₂ dujų kiekiai
Popieriaus polimerizacijos laipsnio įvertinimas	250 vnt.	Įrenginio remonto metu

Naudojant kompleksinę įvairių elektros įrenginių būklę apibūdinančių parametrų registraciją ir analizę galima efektyviai prognozuoti daugumą gedimų ir išvengti pavojingų ir nuostolingų avarių.

4. INTELEKTINIŲ SISTEMŲ TAIKYMAS ELEKTROS ĮRENGINIŲ BŪKLĖS ĮVERTINIMUI, ŽINANT IŠTIRPUSIŲ DUJŲ CHARAKTERISTIKAS

Pastaruoju metu elektros įrenginių būklės analizei pradedami taikyti intelektiniai metodai, kurie apima dirbtinių neuroninių tinklų (DNT), neraiškios logikos (NL) ir ekspertinių sistemų (ES) panaudojimą [4–7]. Šie metodai gali būti taikomi elektros įrenginių galimų gedimų, žinant ištirpusių dujų koncentracijų, izoliacijos varžų ir kitų parametrų vertes, analizei bei prognozei.

Dirbtinių neuronų tinklas – sudėtingos struktūros netiesinis modelis, galintis aproksimuoti bet kokią funkcinę priklausomybę tarp dviejų atskirų duomenų grupių. Neuronų perdavimo funkcija išreiškiama remiantis formule:

4.1. Dirbtinių neuronų tinklai

Dirbtinių neuronų tinklas – sudėtingos struktūros netiesinis modelis, galintis aproksimuoti bet kokią funkcinę priklausomybę tarp dviejų atskirų duomenų grupių. Neuronų perdavimo funkcija išreiškiama remiantis formule:

$$y = f \left[\sum_{i=1}^n w_i x_i + b \right]; \quad (1)$$

čia $x_1 - x_n$ – įėjimo reikšmės; $w_1 - w_n$ – svorių koeficientai; $f(s)$ – neurono vidinė funkcija; b – poslinkis.

DNT sukūrimas apima įėjimo, išėjimo reikšmių tinklo topologijos (struktūros ar taškų išdėstymo) ir svorio reikšmių parinkimą. DNT gali turėti vieną arba keletą paslėptųjų sluoksnių. Nustatant DNT sluoksnių skaičių, įėjimo sluoksnis nevertinamas.

Mokant tinklą, turi būti žinomos įėjimo x_i ir išėjimo y_i duomenų vektorių aibės $(x_1, y_1); (x_2, y_2) \dots (x_k, y_k)$.

Mokymo tikslumas apibūdinamas sumine kvadratine paklaida:

$$e_s = \sqrt{\sum_{i=1}^k (y_i - y_{ai})^2}; \quad (2)$$

čia e_s – suminė kvadratinė paklaida; y_i – i -ojo pavyzdžio išėjimo duomenys; y_{ai} – i -ojo pavyzdžio mokomo neuroninio tinklo išėjimo duomenys (gauti iš duomenų x_i); k – duomenų pavyzdžių skaičius.

Mokant svorių koeficientai keičiami taip, kad e_s mažėtų. Mokyti baigiama, kai suminė kvadratinė paklaida

e_s tampa mažesnė už reikiamą. Išmokytą tinklą reikia testuoti pagal sudarytą testavimo duomenų paketą. Jeigu mokymo ir testavimo paketų ilgis k vienodas, suminė testavimo paklaidų kvadratų suma turi būti apytiksliai lygi mokymo paklaidų kvadratų sumai.

Remiantis transformatorių ir kabelinių linijų techninėmis bei eksploatacinėmis charakteristikomis bei gedimų ir jų priežasčių statistika, dirbtinių neuronų tinklų pagrindu sudaromi gedimų prognozės modeliai. Atlikti skaičiavimai parodo elektros įrenginių (transformatorių ir kabelinių linijų) gedimų prognozavimo galimybes [4]. Tačiau didžiausia problema, su kuria susiduriama naudojant DNT, – statistikos duomenų gavimas ir jų kiekis, siekiant apmokyti DNT.

Taikant tradicinius IDA metodus būna gana sudėtinga identifikuoti, kada gedimas įvyksta skystos, o kada kietos izoliacijos medžiagose, esant kokiam temperatūrai (žemai, aukštai ar vidutinei) ar elektros lanko išlydžio intensyvumui (žemos ar didelės energijos) įvyksta gedimas. Esant tokiems neapibrėžtumams turimų duomenų vien apie ištirpusių dujų koncentracijas ne visada užtenka. Todėl siūloma elektros įrenginių galimų gedimų prognozavimui DNT panaudoti papildomus įrenginio izoliacijos kokybę apibendrinančius rodiklius (pav.).

Įėjimo sluoksnyje yra nurodomi visi analizei reikalingi duomenys. Tiriamuoju atveju pradiniais duomenims priskiriamos septynių ištirpusių dujų koncentracijos ir papildomi elektros įrenginio rodikliai. Prie papildomų įrenginio rodiklių gali būti priskirti ne tik papildomų matavimų duomenys (DI lygis, $tg\delta$, K_{abs} , R_{iz} , C_{iz} ir pan.), bet ir informacija apie elektros įrenginį (įrenginio gamintojas, įrenginio tipas, apvijų tipas, galingumas, amžius, alyvos lygis ir t. t.), informacija apie alyvos mėginį (alyvos mėginio paėmimo data, vieta ir pan.), antrinė informacija (įrenginio gamyklinis numeris, pastotės pavadinimas ir kt.). Ši informacija reikalinga duomenų bazės kūrimui ir pildymui.

Remiantis [4, 5] literatūros šaltiniais, elektros įrenginių gedimų pobūdžio prognozei dažnai pakanka dviejų paslėptų neuronų sluoksnių. DNT vidiniai parametrai (neuronų ir mokymo ciklų skaičius) randami eksperimentiniu būdu.

Išėjimo sluoksnis apima prognozuojamą gedimo tipą (normalus (N), dalinis išlydis mažos energijos (DIM), dalinis išlydis didelės energijos (DID), mažos energijos elektros lanko išlydis (EIM), didelės energijos elektros lanko išlydis (EID), perkaitimas bei popierinės izoliacijos gedimas (Š)). Tolimesnės eksploatacijos rekomendacijos pateikiamos atsižvelgiant į elektros įrenginio dydį, amžių ir kita.

4.2. Neraiškios aibės

Neraiškių aibių teorija, žinant ištirpusių dujų koncentracijas, leidžia kiekybiškai įvertinti kiekvieno gedimo pobūdžio tikimybę. IDA pagrindiniai diagnostiniai nežinomieji gali būti dujų normos, dujų santykio ribos (R) ar pagrindinės dujos (r).

Pagrindinės dujos ($r_1 = C_2H_2$, $r_2 = H_2$, $r_3 = C_2H_4$) ir IEC metodo dujų santykiai ($R_1 = C_2H_2/C_2H_4$, $R_2 = CH_4/H_2$ ir $R_3 = C_2H_4/C_2H_6$) pavaizduojami kaip neraiškių aibių vektoriai G_r ir G_R :

$$G_r = [\mu_{zemas}(r), \mu_{vidutinis}(r), \mu_{aukštas}(r)], \tag{3}$$

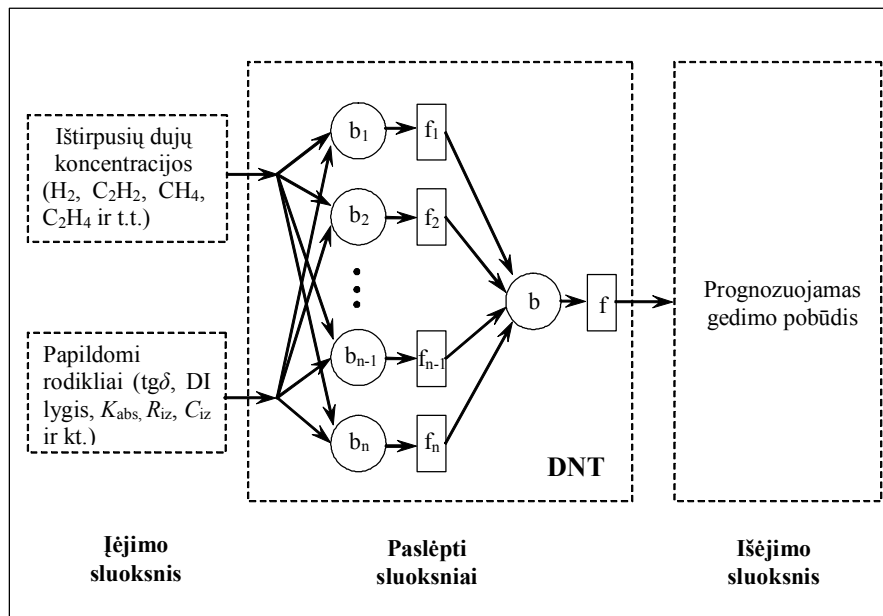
$$G_R = [\mu_{nulis}(R), \mu_{vienas}(R), \mu_{du}(R)]; \tag{4}$$

čia $\mu_{zemas}(r)$, $\mu_{vidutinis}(r)$, $\mu_{aukštas}(r)$ bei $\mu_{nulis}(R)$, $\mu_{vienas}(R)$, $\mu_{du}(R)$ – neraiškių aibių rinkinių žemas, vidutinis, aukštas ir kodų nulis, vienas, du priklausomumo funkcijos, kurios sudaromos atsižvelgiant į priklausomumo funkcijos tipą ir gali būti didėjančio $\mu_D(R)$ arba mažėjančio $\mu_M(R)$ pobūdžio, arba jų derinys $\mu_f(R)$.

Remiantis (3) ir (4) formulėmis TR galimus gedimus įmanoma aprašyti neraiškių aibių vektoriais $G_r(i)$ ir $G_R(i)$ (čia $i = 1 \div m$, m – gedimų tipų kiekis) pakeičiant loginį IR minimizacijos operacija, o loginį ARBA maksimizacijos operacija. Kiekvienas neraiškios diagnozės vektorius normalizuojamas remiantis (5) formule:

$$G_{*n}(i) = \frac{G_*(i)}{\sum_{i=1}^m G_*(i)}, \quad i = 1, \dots, m; \tag{5}$$

čia $G_*(i)$ – pagrindinių dujų (r) ir/arba IEC dujų santykių (R) neraiškios aibės vektorius.



Pav. Dirbtinio neuroono tinklo, taikomo galimo gedimo pobūdžio prognozavimui, architektūra.

Čia b – paslėptų sluoksnių neuronai, f – paslėptų sluoksnių neuronų perdavimo funkcijos

Jungtinis neraiškios diagnostikos vektorius $G(i)$ suformuojamas sujungiant neraiškios diagnozės pagrindinių dujų ir IEC vektorius tarpusavyje remiantis (6) formule:

$$G(i) = w_1 G_{R_n}(i) + w_2 G_{r_n}(i), \quad i = 1, \dots, m; \quad (6)$$

čia m – gedimo tipo kiekis, w_1 , w_2 – svorio koeficientai.

Tyrimais nustatyta [6], jog neraiškių aibių teorijos taikymas elektros įrenginių galimų gedimų pobūdžio prognozavimui padeda išspręsti įprastinių IDA metodų dviprasmiškumo ir neapibrėžtumo problemą. Jungtinis neraiškių kodų – pagrindinių dujų (NKPD) metodas leidžia kiekybiškai įvertinti kiekvieno gedimo tikimybę ir nustatyti daugybinius elektros įrenginių gedimus.

5. GALIOS TRANSFORMATORIŲ GALIMŲ GEDIMŲ POBŪDŽIŲ EKSPERIMENTINIS TYRIMAS

Remiantis IDA metodais (aprašytais 2 skyriuje), atlikta galios transformatorių galimų gedimų analizė. Gedimų prognozavimui panaudoti šešių 110–330 kV transformatorių izoliacinėje alyvoje ištirpusių dujų duomenys, kurių leistinas dujų kiekis alyvoje viršytas ir kuriems buvo nustatyti tam tikri gedimai.

Nagrinėjamų transformatorių gedimų pobūdžių analizės rezultatai pateikti 7 lentelėje.

Atlikus transformatorių galimų gedimų analizę, nustatyta, jog daugeliu atvejų tradiciniai IDA metodai nustato tą patį TR galimą gedimą. 1-ajam TR pagrindinių dujų, IEEE ir Doernenbergo metodais prognozuojamas šiluminis gedimas. Rogerso ir IEC santykių metodais gedimas nenustatomas dėl kodų neatitikimo. Duvalio metodu nustatyta, jog tai gali būti gedimas esant aukštai temperatūrai, GE metodas prognozuoja gedimą, esant vidutinei temperatūrai. Realiai TR nustatytas magnetolaidžio kaitimas viršutiniame junge ir anglies pėdsakai ant C fazės apvijos presavimo žiedo, t. y. aukštos temperatūros šiluminis gedimas. Vadinasi, tiksliausiai gedimas nustatytas Duvalio

metodu. Galimas gedimo pobūdis (elektros lanko išlydis mažos energijos) 2-ajam TR tiksliausiai nustatytas taip pat Duvalio metodu. Realiai šiam TR buvo nustatyti blogi kontaktiniai sujungimai. 4-ajam, 5-ajam bei 6-ajam TR gedimų prognozavimas tradiciniais IDA metodais skiriasi. Toks skirtumas atsiranda todėl, jog egzistuoja elektrinių ir terminių pasekmių ryšys, t. y. atsiradus EI, išsivysto DI, kuris pereina į šiluminį gedimą.

Esant transformatoriuje daugiau nei vienam gedimui, dujos susimaišo ir sutrikdo dujų komponentų santykius. Tokiu atveju IDA santykių metodais gedimas nenusakomas. Vadinasi, analizė, kompleksiskai pritaikius 2 metodus, būtų efektyvesnė ir leistų tiksliau nustatyti galimą įrenginio gedimo tipą.

Taip pat pastebėta, jog skirtingų IDA metodų taikymas transformatorių galimų gedimų analizei reikalauja nevienodų laiko sąnaudų ir žinių. Pagrindinių dujų metodo taikymas paprastas ir nereikalauja daug laiko sąnaudų, tačiau reikalinga nemaža darbo patirtis. Doernenbergo, Rogerso, IEC bei GE metodų taikymas reikalauja didesnių darbo bei laiko sąnaudų. Čia turi būti sukaupta nemaža patirties bei statistikos duomenų bazė. Remiantis dujų santykių metodais tik keliems tyrinėjamiems TR buvo galima nustatyti gedimo pobūdį, tuo tarpu likusiems nebuvo galima to padaryti dėl kodų neatitikimo, t. y. dėl netikslios analizės, nes ne visi gedimai aprašomi kodais.

Elektros įrenginių gedimų diagnostikai kompleksiskai taikant keletą alyvoje ištirpusių dujų analizės metodų arba taikant naujus intelektinius metodus galima gauti išsamesnę ir tikslesnę informaciją apie gedimo pobūdį. Šiais metodais galima sudaryti duomenų bazę, kurios panaudojimas leistų nustatyti dujų pasiskirstymą (kitimą), besivystant tam tikram gedimui.

5. IŠVADOS

1. Tradiciniai IDA metodai neleidžia tiksliai prognozuoti galimus transformatorių gedimus, nes jais nustatomas tik vienas vyraujantis gedimas.

7 lentelė. **Tiriamųjų transformatorių galimi gedimo pobūdžiai nustatyti remiantis IDA metodais**

TR Nr.	Tikras gedimas	Prognozuojamas gedimas IDA metodais						
		Pagrindinių dujų	IEEE C57.104-1991	Doernenbergo	Rogerso	IEC 60599	Duvalio trikampus	GE
1 TR	Sugadintas magnetolaidžio viršutinis jungas	Š	Š	Š	NA	NA	Š3	Š2
2 TR	Blogi kontaktiniai sujungimai	EI	EI	EI	NA	NA	EIM	EI
3 TR	Pažeista popierinė izoliacija	Š	Š	EI	Š	NA	Š2	Š2
4 TR	A fazės kontaktoriaus defektas	DI	DI	DI	NA	DID	EID	Š2
5 TR	Neužveržtas kontaktas ant izoliacinės juostos	DI	DI	EI	NA	NA	Š3	Š2
6 TR	Neužveržtas riebokšlis ir varinė smeigė	Š	Š	EI	Š3	N	Š2	Š1

Sutrumpinimai: NA – netiksliai analizė, Š – šiluminis gedimas (Š1 – gedimas esant žemai temp., Š2 – gedimas esant vidutinei temp., Š3 – gedimas esant aukštai temp.), DI – dalinis išlydis (DID – DI didelės energijos), EI – elektros lanko išlydis (EIM/EID – elektros lanko išlydis mažos/didelės energijos), N – natūralus senėjimas.

2. Tikslėnei elektros įrenginių gedimų prognozei reikia kompleksiskai taikyti keletą IDA metodų. Tokia analizė būtų efektyvesnė ir leistų tiksliau nustatyti galimą įrenginio gedimo tipą.

3. Ištirtų transformatorių gedimo pobūdžių tiksliausia prognozė gauta atskirai taikant Duvalio, Rogerso ir IEC metodus.

4. Ištirpusių dujų analizės metodais gautų rezultatų patikslinimui naudotini intelektiniai (DNT, jungtinis neraiškių kodų–pagrindinių dujų ir pan.) metodai.

5. Naudojant dirbtinių neuronų tinklų modelį, užtenka dviejų paslėptų neuronų sluoksnių, įėjimo skaičius atitinka ištirpusių dujų koncentracijas ir papildomus rodiklius, o išėjimas – galimą gedimo pobūdį.

6. Jungtinio neraiškių kodų–pagrindinių dujų metodo panaudojimas leidžia ne tik nustatyti daugybinius elektros įrenginių gedimus, bet ir kiekybiškai įvertinti kiekvieno gedimo tikimybę.

Gauta 2006 04 18
Parengta 2006 11 05

Literatūra

1. Elektros įrenginių bandymų normos ir apimty. Vilnius, 2001. P. 231.
2. IEEE Std C57.104-1991. IEEE Guide for the interpretation of gases generated in oil-immersed transformers. 1992.
3. Lietuvos standartas. LST EN 60599. Mineraline alyva pripildytosios elektrinės įrangos veika. Ištirpusių ir laisvųjų dujų analizės aiškinimo vadovas (IEC 60599:1999). 2001.
4. Linkevičiūtė B., Morkvėnas A., Navickas A. S., Svinkūnas G. Artificial neural networks models for reliability evaluation of high voltage devices // XIII International Conference on Electromagnetic Disturbances. Bialystok Technical University Faculty of Electrical Engineering. Bialystok, Poland, September 24–26, 2003.
5. Wang Z., Liu Y., Griffin P. J. A Combined ANN and expert system tool for transformer fault diagnosis // IEEE Transactions on Power Delivery. October 1998. Vol. 13. No. 4.
6. Navickas A., Linkevičiūtė B. Galios transformatorių gedimų prognozavimas panaudojant neraiškių aibių teoriją ištirpusių dujų analizei // Energetika. 2005. Nr. 2. P. 41–47.
7. Lin C. E., Ling J. M., Huang C. L. An expert systems for transformer fault diagnosis using dissolved gas analysis // IEEE Transactions on Power Delivery. January 1993. Vol. 8. No. 1.

Birutė Linkevičiūtė, Algimantas Navickas

EFFECTIVENESS OF THE DISSOLVED GAS ANALYSIS METHOD FOR ELECTRICAL EQUIPMENT FAULT INVESTIGATION

S u m m a r y

In the present study, dissolved gas analysis (DGA) methods used to evaluate faults in electrical equipment, and additional factors that characterize the condition of electrical equipment have been reviewed. Using the traditional DGA methods, possibilities for the prognosis of possible faults in a power transformer and the effectiveness of DGA methods have been evaluated. Electrical equipment fault analysis appeared to be more effective and more precise when applying several DGA methods in complex or using intellectual methods.

Key words: electrical equipment, dissolved gas analysis, fault, effectiveness, intellectual methods

Бируте Линкевичюте, Альгимантас Навицкас

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЦЕНКИ НЕИСПРАВНОСТЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МЕТОДА АНАЛИЗА РАСТВОРИМОГО ГАЗА

Р е з ю м е

В работе рассмотрены методы анализа растворимого газа (АРГ), применяемые для оценки неисправностей электрического оборудования, и дополнительные показатели, определяющие состояние электрического оборудования. На основании традиционных методов АРГ оценены возможности прогнозирования возможной неисправности трансформаторов мощности, методов АРГ. Установлено, что анализ неисправностей электрического оборудования является более эффективным и точным при комплексном применении нескольких методов АРГ или интеллектуальных методов.

Ключевые слова: электрическое оборудование, анализ растворившихся газов, неисправность, эффективность, интеллектуальные методы