

Besisukančių elektros mašinų izoliacijos varžos matavimo metodų tyrimas

Jelena Dikun*, Reda Marytė Tamelienė

Klaipėdos valstybinė kolegija, Jaunystės g. 1, Klaipėda

El. paštas: j.dikun@kvk.lt; r.tameliene@kvk.lt

(Gauta 2024 m. vasario mėn.; atiduota spaudai 2024 m. kovo mėn.; prieiga internete nuo 2024 m. gegužės 10 d.)

Anotacija

Straipsnyje analizuojamos elektros įrenginių izoliacijos varžos nusidėvėjimo priežastys ir pasekmės. Apžvelgiami integruoti įprastuose matuokliuose besisukančių elektros mašinų izoliacijos varžos matavimo metodai. Pateiktas izoliacijos varžos matavimo metodų taikymo algoritmas.

Reikšminiai žodžiai: elektros mašinos, izoliacijos nusidėvėjimas, izoliacijos varža, izoliacijos varžos matavimai.

Abstract

The article analyses the causes and consequences of the degradation of the insulation resistance of electrical devices. The insulation resistance measuring techniques that are integrated into traditional meggers are analysed. The algorithm for the application of the insulation resistance measuring methods used for the rotating electrical machines is provided.

Key words: Electrical machines, insulation degradation, insulation resistance insulation resistance measurements

Įvadas

Temos aktualumas. Elektros mašinų patikimą ir nepertraukiamą darbą užtikrina daugybė parametru, vienas svarbiausių – izoliacijos kokybė. Didelę ominę varžą turinčios dielektrinės medžiagos, iš kurių yra sudaroma elektros mašinų izoliacija, užtikrina prevenciją nuo sužalojimų elektros srove bei apsaugo pačios mašinos statorių ir rotorių nuo elektros gedimų. Eksploatavimo metu dielektrinės medžiagos praranda savo izoliacines savybes. Siekiant sumažinti izoliacijos nusidėvėjimo pasekmes, itin svarbu ne tik projektuoti elektros mašinas su tinkamomis izoliacinėmis medžiagomis bei tvarkingai jas eksploatuoti, bet ir nuolat atlikti jų izoliacijos varžos stebėjimą bei vertinti matavimo rezultatus juos lyginant su nacionaliniuose arba tarptautiniuose reglamentuose ir taisyklėse pateiktomis norminėmis vertėmis tuo užtikrinant galimų eksploatavimo problemų atsiradimų prevenciją.

Temos problematika. Šiuo tyrimu siekiama apžvelgti besisukančių elektros mašinų apvijų izoliacijos varžos matavimo metodus, nustatyti jų pritaikomumo galimybes bei privalumus ir trūkumus.

Tyrimo objektas – elektros mašinų apvijų izoliacijos varžos matavimo metodai realizuojami įprastais izoliacijos varžos matavimo prietaisais.

Tyrimo tikslas – atlikti elektros mašinų izoliacijos varžos metodų apžvalgą ir taikymo galimybių analizę.

Tyrimo uždaviniai:

1. Išanalizuoti elektros mašinų izoliacijos nusidėvėjimo priežastis.
2. Apžvelgti izoliacijos varžos matavimo metodus.
3. Pateikti elektros mašinų izoliacijos varžos matavimo metodų taikomumo analizę.

Tyrimo metodas – mokslinės literatūros analizė.

Rezultatų aptarimas

Elektros mašinų izoliacijos nusidėvėjimo priežastys. Elektros mašinos (EM) eksploatavimo trukmė apibrėžiama laikotarpiu, per kurį laikantis nustatytų eksploatavimo sąlygų ir atliekant profilaktinę priežiūrą, užtikrinamas patikimas jos veikimas. Eksploatavimo patirtis parodė, kad EM praranda savo funkcionalumą dažniausiai dėl izoliacijos nusidėvėjimo arba pažeidimo ir tokių gedimų tipai sudaro 30–40 % visų galimų gedimų mašinose (Armando and Sidelmo, 2020). EM



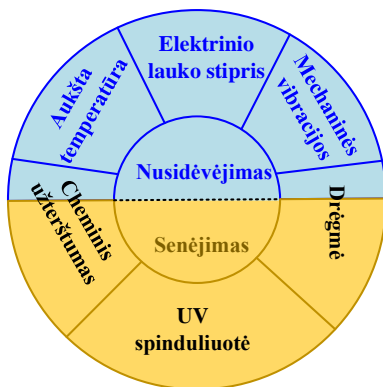
izoliacijos nusidėvėjimą lemia įvairūs veiksniai (1 pav.). Pagrindiniai iš jų yra aukštų temperatūrų, elektrinio lauko, mechaninės vibracijos ir įtempių, drėgmės, cheminio užterštumo ir UV spinduliuotės poveikiai (Logesh et al., 2020).

Perkaitimas yra reikšmingas izoliacijos nusidėvėjimo veiksnys. Dėl aukštų temperatūrų izoliuojanti medžiaga laikui bėgant keičia savo vidinę struktūrą, dėl to jos viduje atsiranda mikroskopinių įtrūkimų ir ji tampa trapi. Todėl mažėja izoliuojančios medžiagos dielektrinis atsparumas. Šiluminis poveikis gali atsirasti dėl nepertraukiamo EM veikimo esant aukštai temperatūrai arba dėl periodinių temperatūrų pasikeitimų EM paleidimo ir stabdymo metu (Addo, Normanyo and Quarshie, 2021).

Didelis elektrinio lauko stipris, galintis susidaryti izoliuojančios medžiagos viduje dėl įtampos šuolių ir pereinamųjų procesų, gali sukelti aukštą dielektriko jonizaciją ir laidžiųjų takų susidarymą, dėl kurių medžiagos viduje sukliamos dalinės iškvrovos. Šios dalinės iškvrovos laikui bėgant sukelia izoliacijos nusidėvėjimą.

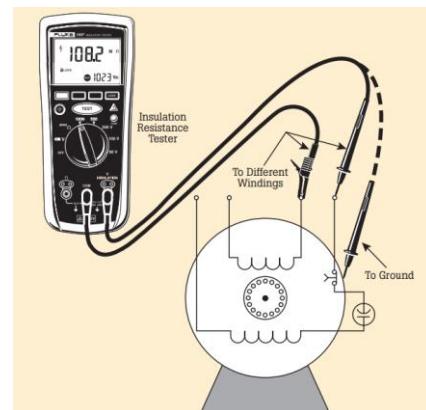
Mechaninės vibracijos ir įtempiai gali sukelti fizinę izoliacijos nusidėvėjimą. Besilankstantys ir besislenkantys izoliuojančios medžiagos poslinkiai sukelia įtrūkimų ir tuštumų, dėl kurių ilgainiui mažėja dielektrinės medžiagos elektrinis atsparumas (Devarajan, Chinnusam and Kaliappan, 2020).

Drėgmė gali prasiskverbti į izoliaciją, sumažindama jos dielektrinį atsparumą ir paspartindama nusidėvėjimo procesą. Taip pat dėl drėgmės izoliuojančioje medžiagoje gali susidaryti laidieji elektros srovei kanalai. Drėgmės atsiradimas EM izoliacijos viduje yra dažniausiai paplitusi problema, ypač tose EM, kurios eksploatuojamos drėgnoje aplinkoje.



1 pav. Elektros mašinų izoliacijos nusidėvėjimo priežasčių ir pasekmių diagrama. Šaltinis: sudaryta autorių.

Fig.1. Diagram of the insulation degradation causes and consequences of electrical machines. Source: compiled by authors



2 pav. Elektros mašinos izoliacijos varžos matavimas DC įtampos metodu. Šaltinis: Insulation resistance testing, Fluke Corporation, 2003, 2007.

Fig.2. Measurement of electrical machine insulation resistance by the DC voltage method. Source: Insulation resistance testing, Fluke Corporation, 2003, 2007

Cheminių medžiagų, tokių kaip alyvos, tirpiklių ar kitų teršalų poveikis gali neigiamai veikti izoliuojančią medžiagą. Cheminės reakcijos, vykstančios tarp izoliaciją sudarančio dielektriko ir kitų išvardytų cheminių junginių, blogina izoliacijos savybes.

1 lentelė. Elektros mašinų izoliacijos dielektrinių medžiagų mechaninės savybės

Table 1. Mechanical properties of electrical machine dielectric materials used for insulation

Fiziniai dielektrinių medžiagų parametrai		Cheminiai dielektrinių medžiagų parametrai	
Parametro pavadinimas	Žymėjimas / matavimo vienetai	Parametro pavadinimas	Žymėjimas / matavimo vienetai
Santykinė dielektrinė skvarba	ϵ_r	Drėgmės absorbcijos koeficientas	%
Elektrinis atsparumas	E (V/m)		
Mechaninis tvarumas	R (N/m ²)	Atsparumas cheminiams poveikiams	mg(KOH)/g
Dielektriniai galios nuostoliai	P _D (W)		

Eksplloatuojant EM išorėje (laivų denių, jūrinių naftos platformų mechanizmų EM), saulės ultravioletinė (UV) spinduliuotė laikui bėgant skatina dielektrinės medžiagos nusidėvėjimą. Taip pat izoliuojančios medžiagos dėvisi natūraliu būdu, nes laikui bėgant fiziniai ir cheminiai dielektrinių medžiagų parametrai (1 lentelė) mažėja ir mašinų izoliacijos eksploatacinės charakteristikos blogėja (Andraschek et al., 2016).

Elektros mašinų izoliacijos varžos matavimo metodai.

Siekiant išvengti ir sumažinti EM gedimus ir prastovas, daugelyje pramonės šakų apžiūrų ir remonto metu atliekami profilaktiniai mašinų apvijų izoliacijos varžos matavimai (IVM). IVM leidžia įvertinti mašinos apvijų būklę, apibūdinančią jų izoliacijos nusidėvėjimo laipsnį. Tyrimai (Faiz, Nejadi-Koti and Valipour, 2017) ir (Terron-Santiago et al., 2021) rodo, kad aukštos įtampos elektros mašinose apvijų izoliacijos pažeidimų pasitaiko dažniau nei žemos įtampos mašinose. Remiantis IEC 60034-27-4:2018 ir IEEE 43-2000 standartais elektros mašinų, kurių nominali galia yra lygi arba yra didesnė už 750W, IVM vykdomi trimis pagrindiniais metodais: nuolatinės įtampos (DC – Direct Current) metodais, dalinės iškrovos (dielektrinės iškrovos) metodu (DD - Dielectric Discharge) bei pakopinės įtampos metodu (SV-Step Volatge). Visi išvardyti metodai grindžiami Omo dėsniumi, t. y. bandomajai izoliacijai yra tiekama matavimo prietaisu generuojama įtampa U_{Test} , todėl izoliacija pradeda tekėti nuolatinė srovė I_{DC} . Skaitmeninis IVM prietaisas iš esmės matuoja tekančios dielektriko viduje srovės I_{DC} reikšmę. Apskaičiuotas bandomosios įtampos U_{Test} ir srovės I_{DC} santykis U_{Test}/I_{DC} , kuris yra lygus bandomojo dielektriko izoliacijos varžai (Riz), išreikštai $M\Omega$, atvaizduojamas matavimo prietaiso ekrane.

Izoliacijos varžos matavimai DC įtampos metodais. Šie metodai, priklausomai nuo bandomosios įtampos U_{Test} tiekimo trukmės ir norimų pasiekti matavimo rezultatų, suskirstomi į trumpalaikį IVM metodą (Spot-Test: ST) ir metodus, kurie vadinami PI (Polarization index) ir DAR (Dielectric absorption index) metodais; pasartųjų dviejų metodų taikymas pagrįstas bandomosios įtampos U_{Test} tiekimo laiko intervalų keitimu.

Trumpalaikis IV matavimo metodas (Spot-Test: ST) yra paprasčiausias EM apvijų IVM metodas. Atliekant IVM ST metodu mašinos apvijai (apvijoms) trumpai (apie 30 arba 60 s) tiekama tam tikro dydžio (2 lentelė) įtampa (2 pav.), o pasibaigus nustatytam matavimo laikui yra nuskaitoma ir užfiksuojama EM izoliacijos varžos (Riz) reikšmė, atitinkanti matavimo momentą.

2 lentelė. Trumpalaikio Riz matavimo metodo (ST) bandymo įtampos reikšmės
Table 2. The test voltage values of the Spot-Test insulation resistance (Riz) measurement method

Elektros mašinos vardinė įtampa [V]	Bandomoji įtampa, [V]
< 1000	500
1000–2500	500–1000
2501–5000	1000–2500
5001–12 000	2500–5000
> 12 000	5000–10 000

ST matavimo metodu gauta izoliacijos reikšmė palyginama su mažiausia leidžiama Riz reikšme, kuri nustatoma remiantis IEEE 43-2000 standartu (3 lentelė). Šis IVM metodas leidžia greitai ir lengvai analizuoti bendrą apvijų izoliacijos būklę. Būtina pabrėžti, jog IVM rezultatų reikšmėms žymią įtaką daro apvijų temperatūra ir drėgmė. Todėl kitus tuos pačius EM Riz matavimus būtina atlikti esant toms pačioms temperatūroms ir drėgmės lygiams, t. y. atlikti matavimus tomis pačiomis sąlygomis. Taikant ST metodą galima stebėti apvijų izoliacijos kokybę, lyginant esamą išmatuotą Riz vertę su kelių ankstesnių Riz matavimų rezultatais. Įprastai ST metodo Riz matavimo rezultatai atvaizduojami grafiku (3 pav.), pagal kurį galima stebėti ir analizuoti izoliacijos nusidėvėjimo eigą laiko atžvilgiu bei numatyti ir imtis prevencijos priemonių, kad būtų išvengta izoliacijos tolesnio nusidėvėjimo. Jei matavimo sąlygos išlieka identiškos, tai darant periodinius trumpalaikius IVM ST metodu, stebint ir interpretuojant bet kokius apvijų izoliacijos Riz pokyčius, gaunamas aiškus apvijų izoliacijos būklės vertinimas. Tai reiškia, jog matavimas, kurio metu buvo užfiksuota santykinai maža izoliacijos varžos vertė, kuri laikui bėgant



išlieka stabiliai maža, neturėtų kelti susirūpinimo. Tuo tarpu reikšmingas izoliacijos varžos sumažėjimas tam tikrame laiko diapazone (3 pav.), net jei izoliacijos varža yra didesnė už standartu rekomenduojamą skaičiuotiną mažiausią vertę (3 lentelė), reikalauja Riz sumažėjimo problemos paieškos ir šalinimo.

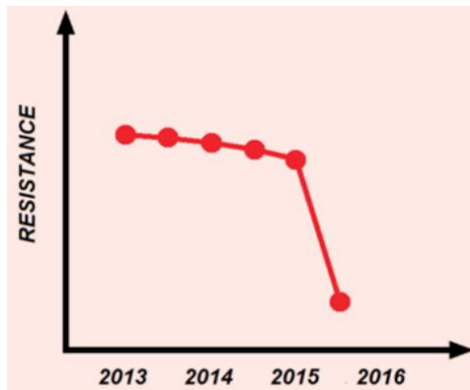
3 lentelė. Elektros mašinų izoliacijos varžos Riz mažiausios leistinos vertės
 Table 3. The minimum permissible values of the electrical machine insulation resistance (Riz)

Riz, MΩ	Pastaba
$R_{IZ(min)} = U_N(kV) + 1$	Daugumai apvijų, pagamintoms iki maždaug 1970 m., visoms žadinimo apvijoms.
$R_{IZ(min)} = 100$	Daugumai DC srovės inkarų ir AC srovės apvijoms, pagamintoms ritės pavidalu po maždaug 1970 m.
$R_{IZ(min)} = 5$	Daugumai mašinų, kurių vardinė įtampa mažesnė nei 1 kV

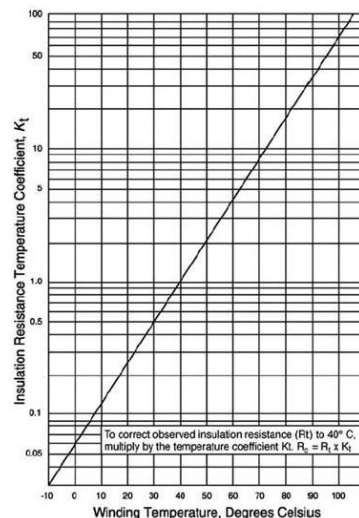
Apskritai, bet koks staigus izoliacijos varžos sumažėjimas parodo, kad yra tam tikra problema, kurią reikia iširti (Armando and Sidelmo, 2020). Atliekant matavimus ST IVM metodu, Riz reikšmė turi būti koreguojama atsižvelgiant į apvijų temperatūrą (IEEE 43-2000), nes visų kietų dielektrikų ominė varža priklauso nuo temperatūros: didėjant medžiagos temperatūrai, jos ominė varža mažėja. IEEE 43 standartas reglamentuoja Riz reikšmės taisymą, apskaičiuojant gautą Riz reikšmę 40 °C temperatūrai pagal nurodytą žemiau formulę (1) bei taikant pataisos koeficiento K_{t40} priklausomybę nuo EM apvijų temperatūros (4 pav.).

$$R_{40} = K_{t40} \cdot R_m \tag{1}$$

čia: R_{40} – koreguota 40 °C izoliacijos varža, [MΩ];
 K_{t40} – koreguojantis koeficientas; nustatomas iš grafiko (3 pav.);
 R_m – išmatuota izoliacijos varžos reikšmė, [MΩ].



3 pav. Izoliacijos varžos matavimo rezultatų grafikas taikant ST IVM metodą. Šaltinis: AEMC Instruments-Chauvin Arnoux Group, 2015.
Fig.3. Graph of insulation resistance measurement results using the Spot-Test method. Source: AEMC Instruments-Chauvin Arnoux Group, 2015

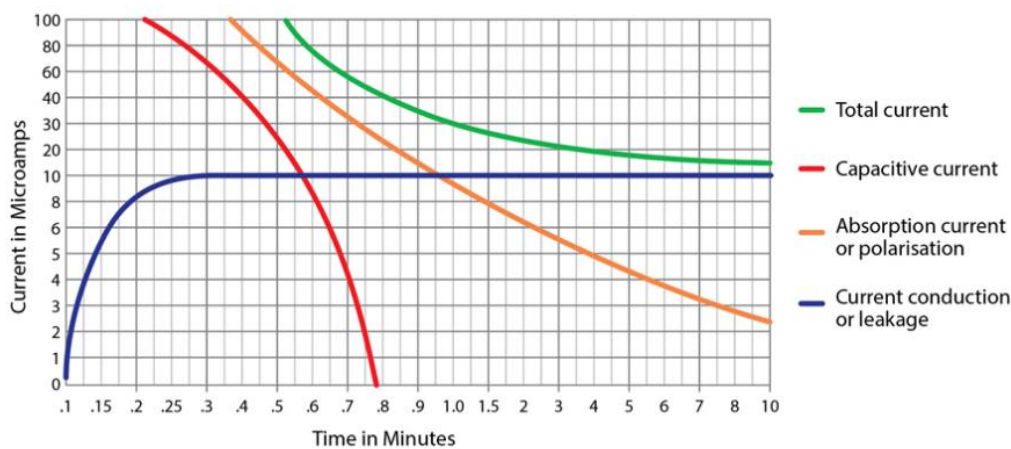


4 pav. Izoliacijos varžos (Riz) verčių koregavimo priklausomybė nuo mašinos apvijų temperatūros. Šaltinis: IEEE 43-2000, Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery.
Fig.4. The correction dependency of the insulation resistance (Riz) values on the machine winding temperature. Source: IEEE 43-2000, Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery

PI ir DAR koeficientų matavimo metodai. Šie metodai apima izoliacijos varžos verčių nuoseklų matavimą matavimo prietaisuose nustatytais laiko intervalais (Gomez and Swapnil, 2023). Matavimo reikšmės, išmatuotiems PI ir DAR metodais, EM apvijų temperatūra praktiškai įtakos



neturi, todėl juos galima naudoti nekoreguojant rezultatų. Jei izoliacinė medžiaga yra geros būklės, nuotėkio srovė I_n (arba laidumo srovė I_L) dielektriko viduje bus maža (5 pav.). Tiekiant izoliacijai bandomąją įtampą U_{Test} , matuojamos izoliacijos varžos R_{iz} vertė laikui bėgant didėja, nes talpinė I_C (dielektriko įkrovimo) ir sugerties I_S srovės dielektrike mažėja. Laikas, būtinas minėtoms srovėms (I_C ir I_S) nusistovėti (nustoti keistis) yra vadinamas stabilizavimo laiku ir priklauso nuo izoliacinės medžiagos tipo (Cimino et al., 2018). Jei apvijų izoliacija yra prastos būklės (pažeista, nešvari ir / arba drėgna), nuotėkio srovės I_n reikšmė nesikeis ir bus labai didelė, dažnai viršijanti talpinės įkrovimo I_C ir dielektrinės sugerties I_S sroves. Tokiais atvejais izoliacijos varžos matavimo vertė labai greitai nusistovi esant aukštai bandomajai įtampai U_{Test} . Analizuojant izoliacijos varžos vertės kitimą priklausomai nuo bandomosios įtampos U_{Test} pridėjimo laiko, galima įvertinti izoliacijos kokybę. Todėl PI ir DAR IVM metodai tinka profilaktinei besisukančių EM priežiūrai ir jų izoliacijos stebėjimui. Įprastai šiais metodais gauti R_{iz} matavimo rezultatai nėra užrašomi, tačiau rekomenduojama registruoti periodinius R_{iz} matavimus siekiant numatyti ir vykdyti prevencinės EM priežiūros programą (Torkaman and Karimi, 2015).



5 pav. Izoliacijos srovių tipų nuo laiko priklausomybės: Total current-bendra srovė I_T ; Capacitive current- talpinė srovė I_C ; Absorption current or polarisation current - sugerties srovė I_S arba poliarizacijos srovė I_P ; Current conduction or leakage current - laidumo srovė I_L arba nuotėkių srovė I_n . Šaltinis: Gomez and Swapnil, 2023.

Fig.5. The correction dependency of the insulation resistance (R_{iz}) values on the machine winding temperature.
 Source: Gomez and Swapnil, 2023

Izoliacijos varžos matavimas PI metodu taikomas siekiant sumažinti matavimo rezultatų priklausomybę nuo temperatūros. PI metodo matavimo rezultatas yra dviejų R_{iz} matavimo reikšmių, gautų dviem skirtingiems laiko momentams 10 minučių ir 1 minutės, santykis:

$$PI = \frac{R_{iz(10min)}}{R_{iz(1min)}} \quad (2)$$

čia: PI-poliarizacijos indeksas;

R_{iz} (10 min) – apvijų / apvijų R_{iz} reikšmė, atliekant IVM matavimą per 10 min., [$M\Omega$];

R_{iz} (1min) – apvijų / apvijų R_{iz} reikšmė, atliekant IVM matavimą per 1 min., [$M\Omega$].

EM apvijų temperatūra esant 10 minučių bandymo trukmei nesikeičia ir išlieka pastovios konkrečios reikšmės. Natūralu, kad tos pačios EM apvijų temperatūra esant bandymo trukmei, lygiai 1 minutei, tuo labiau nesikeis. Todėl tiek R_{iz} (10 min) reikšmė, gauta praėjus 10 minučių po bandomosios įtampos U_{Test} tiekimo apvijoms, tiek R_{iz} (1 min), praėjus 1 minutei – bus gautos esant tai pačiai apvijų temperatūrai ir temperatūrinis pataisos koeficientas abiejų matavimų bus vienodas. Būtent dėl to PI IVM rezultatai praktiškai nepriklauso nuo apvijų temperatūros pokyčių.

R_{iz} matavimų PI metodu vertinimas pagrįstas nuotėkio I_n ir laidumo I_L srovių (5 pav.) palyginimų su poliarizacijos srove I_P . Jei šios dvi srovės (I_n ir I_L) yra daug didesnės už poliarizacijos



srovę I_p , PI santykis bus maždaug lygus vienetui, o tai reiškia, jog nuotėkio I_n ir laidumo I_L srovės yra pakankamai didelės, tai byloja apie abejotinas izoliacijos dielektrines savybes. Ir atvirkščiai, jei, lyginant su poliarizacijos srove I_p , nuotėkio I_n ir laidumo I_L srovės yra mažos, tai PI koeficientas bus didesnis nei 2, o tai rodo, kad izoliacijos savybės yra pakankamai geros. Maža PI santykio reikšmė nurodo, kad apvija užteršta alyva, nešvarumais arba yra drėgna (Verginadis et al., 2022).

Kadangi tekant srovei EM apvijos įkaista ir yra padengtos izoliacija, izoliuojančių medžiagų temperatūra taip pat didėja. Todėl besisukančių EM konstrukcijose naudojamos izoliacinės medžiagos skirstomos į izoliacijos klases. Izoliacijos klasė nurodo maksimalią leistiną izoliacijos temperatūrą, kurią dielektrikas gali atlaikyti eksploatacijos metu. Todėl minimali PI koeficiento reikšmė skirtingoms izoliacijų klasėms nustatoma 60034-27-4:2018 standartu. PI metodo rezultatų vertinimo skalė reglamentuojama IEEE 43-2000 ir 60034-27-4:2018 standartais yra pateikta 4 lentelėje. PI santykio matavimo metodas idealiai tinka matuoti EM apvijų izoliacijos varžą, kai izoliuojanti medžiaga sudaryta iš kietųjų dielektrinių medžiagų (Dulskiy, Kruchek, and Kolpahchyan, 2021).

4 lentelė. PI ir DAR izoliacijos varžos matavimo metodų rezultatų vertinimas
Table 4. The evaluation of the insulation resistance measurement results using PI and DAR methods

PI metodas		DAR metodas				
PI reikšmės priklausomybė nuo izoliacijos būklės		Izoliacijos klasės ir mažiausia leistina PI reikšmė			DAR reikšmės priklausomybė nuo izoliacijos būklės	
PI vertė	Vertinimas	Izoliacijos klasė	Didžiausia leistina temperatūra, °C	Mažiausia leistina PI vertė	DAR vertė	Vertinimas
1.0–2.0	Kelianti įtarimą	A	105	1.5	< 1.25	Kelianti įtarimą
2.0–4.0	Gera	B	130	2.0	1.25–1.6	Gera
> 4.0	Labai gera	F	155	2.0	> 1.6	Labai gera
		H	180	2.0		

Izoliacijos varžos matavimas DAR metodu. Įrangai arba įrenginiams, kurių izoliacijoje sugerties srovė I_s mažėja greitai (kas būdinga EM su naujos kartos izoliuojančiomis medžiagomis), vietoj PI santykio matavimo metodo taikoma jo trumpesnė atmaina – DAR metodas. PI metodu matavimo metu sugerties srovė I_s mažėja sparčiai: apie tai byloja atvaizduojama matavimo prietaisu praktiškai nebesikeičianti R_{iz} reikšmė, kas reiškia, jog izoliacija praktiškai nesugeria teikiamos testuojamai medžiagai srovės ir visa ši srovė paverčiama į laidumo srovę I_L . Šiuo atveju PI indeksas bus lygus 1 ir patartina pakartoti IVM taikant DAR matavimo metodą (Dulskiy, Kruchek, and Kolpahchyan, 2021), nes skirtingai nei PI metodas DAR metodas nusako drėgmės buvimą dielektrike ir priklausomai nuo DAR rezultatų skalės verčių (4 lentelė) numatomi izoliacijos džiovinimo būdai. Taikant DAR santykio IVM metodą izoliacijos būklė įvertinama R_{iz} rezultatų, gautų esant 30 ir 60 sekundžių, matavimų santykiu. DAR koeficientas nustatomas taip:

$$DAR = \frac{R_{iz(60s)}}{R_{iz(15s)}} \quad (3)$$

čia: DAR - dielektrinės absorbcijos indeksas;

R_{iz} (60 s) – apvijos / apvijų R_{iz} reikšmė, atliekant IVM matavimą per 60 sekundžių, [MΩ];

R_{iz} (15 s) – apvijos / apvijų R_{iz} reikšmė, atliekant IVM matavimą per 15 sekundžių, [MΩ].

Dalinės iškvos metodas. *Dielektrinės iškvos testas (DD arba PD).* Skirtingai nuo tradicinių izoliacijos varžos matavimo metodų, tokių kaip ST metodas, PI ir DAR, kurių metu iš esmės yra matuojamos srovės dielektriko įkrovimo proceso metu, DD bandymo metu yra įvertinama izoliuojančios medžiagos iškvos srovė. Atliekant DD testą, nustatomas izoliacijos nusidėvėjimo procesas, t. y., ar izoliacijos nusidėvėjimo požymiai didėjo ar ne (Cimino et al., 2018). Aukštos



įtampos elektros įrenginių elektros izoliacija gaminama siekiant dešimtmečius atlaikyti įvairias elektrines ir mechanines apkrovas. Tačiau drėgmė ir / arba užterštumas gali paspartinti natūralų izoliacijos nusidėvėjimo procesą. Taip pat DD testas padeda tiksliai nustatyti pagrindines turinčias įtakos izoliacijos nusidėvėjimui priežastis (drėgmės atsiradimą izoliacijoje, užterštumą). Remdamiesi DD matavimo rezultatais ir nustatyta priežastimi, imamasi atitinkamų veiksnių supaprastėjusiai izoliacijai pagerinti. Tokie veiksniai apima apvijų izoliuojančios medžiagos džiovinimą, valymą ar net izoliacijos pakeitimą (Ji et al., 2023).

DD bandymo metu bandomajai izoliacijai per 10–30 minučių tiekama aukšta bandomoji įtampa U_{Test} . Per šį laiko tarpą dielektrikas visiškai įkraunamas. Vėliau po dielektriko įkrovimo vyksta absorbcijos procesas t. y., dielektriko molekulių tarpusavio pertvarkymas ir jų poliarizacija izoliacijos viduje. Absorbcijos metu izoliacija sugeria tiek elektros energijos, kiek gali. Kol vyksta absorbcijos procesas, vienintelė srovė, kuri ir toliau teka per izoliaciją, yra nuotėkio srovė I_n (I_L). Nuotėkio srovė I_n paprastai egzistuoja tol, kol izoliacija yra veikiamą bandomosios įtampos U_{Test} . Pasibaigus absorbcijos procesui ir visiškai įkrovus izoliaciją, nutraukiamas bandomosios įtampos U_{Test} tiekimas ir pradedamas dielektriko iškrovimas talpinės srovės I_C pavidalu. Tam, kad greitai iškrauti izoliacijoje sukauptą krūvį, talpinei srovei I_C sudaroma sąlyga tekėti per matuoklyje įtaisytus rezistorius, turinčius mažą ominię varžą, dėl to izoliacijoje sukaupta elektros energija išsisklaido šilumos pavidalu pačiame matuoklyje. Iškrovimo metu įtampa izoliacijos viduje sparčiai mažėja. Praėjus 60 sekundžių (vienai minutei) po iškrovimo proceso pradžios matavimo prietaisai matuoja likusią vis dar tekančią srovę izoliacijoje (Madhar et al., 2021). Būtent šios srovės dydis nusako bandomosios izoliacijos būklę, leidžiant tiksliai įvertinti izoliacijos poliarizacijos lygį ir drėgmės kiekį. DD bandymo rezultatas apskaičiuojamas remiantis (4) lygtimi, o izoliacijos vertinimo kriterijai yra pateikti 5 lentelėje (IEC 60270:2000).

$$DD = \frac{I_{(1min)}}{U \cdot C} \quad (4)$$

čia: $I_{(1min)}$ - srovės reikšmė, išmatuota, praėjus 1 minutei po iškrovimo proceso pradžios, [mA];

U - bandomoji įtampa, [V];

C - bandomosios apvijos / apvijų izoliacijos talpa, [F].

Daugiasluoksneje izoliacijoje vieno sluoksnio pažeidimas negali žymiai sumažinti matuojamos izoliacijos varžos R_{iz} reikšmės (Madonna et al., 2020). Toks daugiasluoksnės izoliacijos supaprastėjimas taikant ST matavimo metodą arba matuojant izoliacijos PI ir DAR koeficientus įprastai neaptinkamas. Tačiau DD IVM metodas gali aptikti per didelę sugerties srovę I_s , kuri gali atsirasti, kai vienas iš daugiasluoksnio dielektriko sluoksnių yra pažeistas arba užterštas.

5 lentelė. DD izoliacijos varžos matavimo metodo rezultatų vertinimas

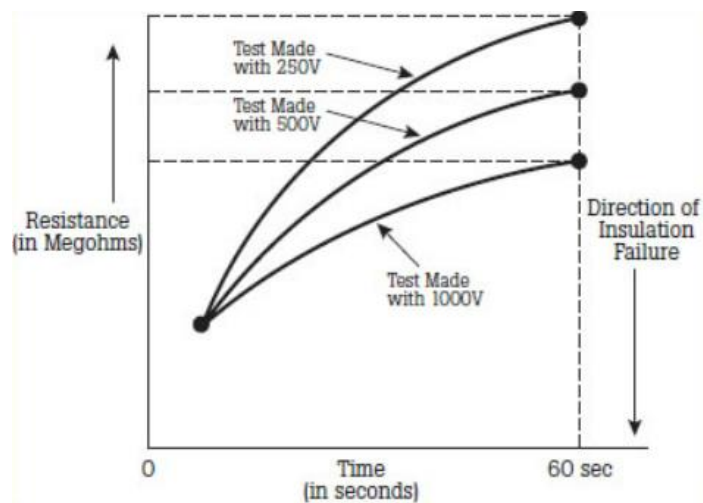
Table 5. The evaluation of insulation resistance measurement results using the DD method

DD koeficiento reikšmė	Izoliacijos varžos būklė
> 7	Bloga
4–7	Kelianti įtarimą
2–4	Gera
< 2	Labai gera

Pažeisto sluoksnio iškrovimo srovės laiko pastovioji skirsis nuo kitų nepažeistų sluoksnių iškrovimo srovių laiko pastoviosios. Todėl bendra iškrovimo srovė bus didesnė nei ji galėtų būti esant visiems nepažeistiems daugiasluoksnio dielektriko sluoksniams. Svarbu pažymėti, kad DD metodo reikšmės priklauso nuo EM apvijų temperatūros. Todėl vertinant izoliacijos būklę DD koeficiento matavimai turėtų būti atliekami panašiomis temperatūros sąlygomis (Addo, Normanyo and Quarshie, 2021) ir koreguojami taikant lygtį (1).



Izoliacijos varžos matavimai pakopinės įtampos metodu. Pakopinės įtampos metodas (*SV-Step Voltage*). Atliekant IVM SV metodu, izoliacijos matuokliu tiriamajai izoliacijai laiko intervalais po 60 sekundžių tiekama skirtingo dydžio bandomąją įtampą U_{Test} . Tokių matavimo metu kas kart didinant bandomoji įtampa U_{Test} stengiamasi nustatyti bet kurią Riz reikšmės sumažėjimą, nes matavimų rezultatai atskleidžia izoliacijos suprastėjimo požymius, kurie pasireiškia tik esant aukštesnei bandomajai įtampai U_{Test} (Sun et al., 2019). Taikant SV IVM metodą, drėgmė ir užterštumai izoliacijoje paprastai aptinkami esant bandomajai įtampai U_{Test} , kuri turi būti žemesnė už EM vardinę įtampą (U_N). Palaipsniui didinant bandomąją įtampą U_{Test} iki vardinės U_N , pažeistose arba drėgnose dielektriko zonose izoliacijos varžos Riz matuojama vertė sparčiai mažėja. Toks Riz sumažėjimas tampa akivaizdus lyginant nuoseklius matavimų rodmenis (6 pav.). Pirmiausiai atliekamas Riz matavimas esant žemesnei įtampai U_{Test1} , pvz., 500 V, ir užrašoma izoliacijos varžos reikšmė. Iškovus apvijų izoliaciją, atliekamas kitas bandymas esant aukštesnei bandomajai įtampai U_{Test2} ($U_{Test2} > U_{Test1}$), pavyzdžiui, 2500 V ir Riz reikšmė vėl užrašoma. Bet koks skirtumas tarp šių dviejų izoliacijos varžos matavimo reikšmių nurodo galimus suprastėjimus, kuriuos reikia toliau tirti (Torkaman and Karimi, 2015).



6 pav. Izoliacijos varžos matavimų SV metodu rezultatų grafikas. Šaltinis: AEMC Instruments-Chauvin Arnoux Group, 2015.

Fig.6. The graph of insulation resistance measurement results using the SV method. Source: AEMC Instruments-Chauvin Arnoux Group, 2015

SV IVM metodas padeda aptikti per didelę drėgmę arba teršalus EM izoliacijoje, kurių vardinė įtampa U_N yra lygi arba didesnė už matavimo prietaiso bandomųjų įtampų diapazono aukščiausią įtampą ($U_{Test\ max}$). Netgi esant bandomajai įtampai mažesnei už vardinę mašinos įtampą, t. y. $U_{Test\ max} < U_N$, mažesnė izoliacijos varžos reikšmė Riz esant aukštesnei bandomajai įtampai (U_{Tmax}) dažnai nusako užterštumą arba drėgmės buvimą apvijų izoliacijoje. Todėl SV metodu galima aptikti izoliacijos suprastėjimo požymius, kurie gali būti nepastebimi esant žemesnėms bandomosioms įtampoms. Norint pasiekti optimalius Riz matavimo rezultatus SV metodu, patartina naudoti bandymo įtampų 1:5 santykį (pvz., 500 ir 2500 voltų). Įrodyta, kad atliekant drėgnos arba užterštos apvijų izoliacijos IVM esant bandymo įtampų santykiui 1:5, Riz reikšmės pokytis sudaro 25 % (Verginadis et al., 2022).

Izoliacijos varžos matavimo metodų taikymas

Visi šiame straipsnyje apžvelgti IVM metodai gali būti atliekami įprastais skaitmeniniais matavimo prietaisais, kurie vadinami megometrais. Tačiau, turint penkis galimus pasirinkimus, iškyla klausimas, kurį iš jų taikyti. *ST* matavimo metodą patartina taikyti pirmiausiai, nes šis bandymas yra trumpiausias iš visų galimų ir matavimo rezultatai nusako bendrą EM izoliacijos būklę „tenkinama-netenkinama“ vertinimo diapazone. Tačiau šio testo rezultatai turi būti koreguojami taikant temperatūrinį pataisos koeficientą. *ST* bandymo metodo taikymas nusakomas

įmonės profilaktinės priežiūros grafiku. Tačiau, jei ST matavimo metodo rezultatai yra žemesni už mažiausią leistiną Riz reikšmę, tai prasminga taikyti PI koeficiento IVM metodą, kuriuo galima nustatyti izoliacijos nusidėvėjimo požymius, tokius kaip užterštumą ir apvijų drėgnumą. Jei EM izoliacija yra pagaminta iš naujos kartos izoliuojančių medžiagų (tai nustatoma iš EM techninės specifikacijos), tai po keliančio įtarimą ST matavimo patartina iširti mašinos apvijų izoliaciją taikant DAR koeficiento nustatymo bandymą, kurio metu taip pat aptinkami apvijų drėgnumo bei užterštumo laipsniai.

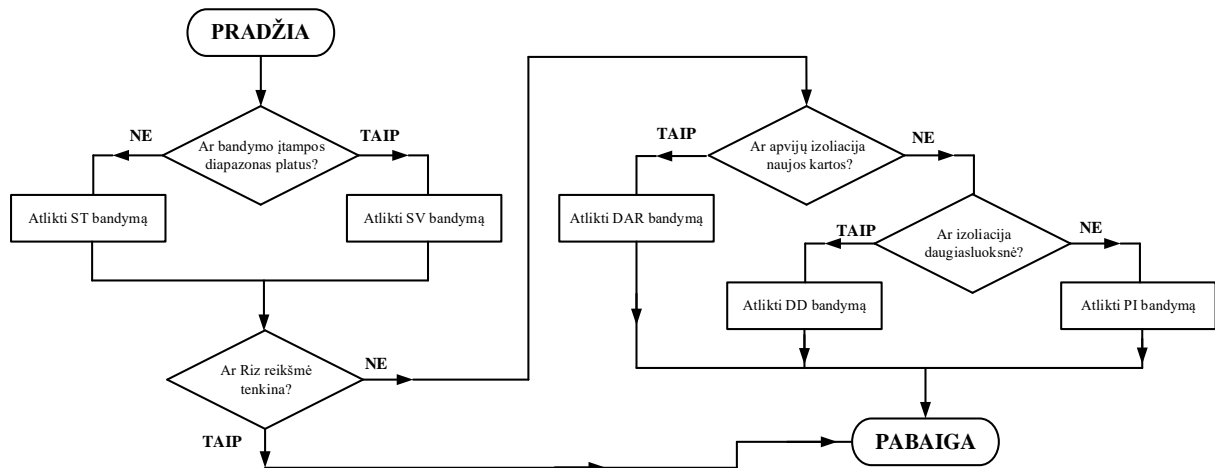
6 lentelė. Elektros mašinų izoliacijos varžos matavimo metodų lyginamoji suvestinė
Table 6. A comparative summary of electrical machine insulation resistance measurement methods

Riz matavimo metodas	R _{iz} būklės vertinimas	Atlikimo trukmė	Rezultatų korekcija temperatūros poveikiui	Bandymų atlikimas tomis pačiomis sąlygomis	Taikymo ypatumai
ST	Gera–bloga	30 arba 60 s	Būtina	Rekomenduotina	Visoms izoliuojančioms medžiagoms
PI	Užterštumas, drėgnumas	600 ir 60 s	Netaikoma	Nepaisoma	Senos kartos izoliuojančioms medžiagoms
DAR		60 ir 15 s	Netaikoma	Nepaisoma	Naujos kartos izoliuojančioms medžiagoms
DD	Užterštumas, drėgnumas, mikrotrūkiai	10–30 min +60 s	Būtina	Rekomenduotina	Daugiasluoksnėms izoliuojančioms medžiagoms
SV	Užterštumas, drėgnumas	60 s+60 s+60 s	Netaikoma	Rekomenduojama	Visoms izoliuojančioms medžiagoms

Jei megommetrą galima suderinti DD matavimo metodui ir jeigu EM bandoma izoliacija sudaryta iš kelių sluoksnių (šis faktas taip pat nustatomas iš EM techninės specifikacijos), tai vietoj PI ir DAR koeficientų matavimų po ST įtariamų bandymų rezultatų būtina matuoti Riz varžą DD metodu, nes DD metodas nustato tiek nusidėvėjimo (mikrotrūkių) atsiradimą, tiek drėgmės laipsnį bei užterštumo požymius apvijų izoliacijoje. Iš dalies DD IVM metodas yra informatyvesnis nei PI ir DAR koeficientų nustatymo metodai, tačiau jo atlikimo trukmė yra ilgesnė nei PI ir DAR. SV bandymas iš esmės yra ST metodo atmaina, kuriuo metu nustatomas dielektriko drėgnumo laipsnis arba jo užterštumas. SV tiek kartų yra ilgesnis už ST, kiek bandomosios įtampos pakopų gali pasiūlyti matavimams taikomas megommetras. Įprastai taikomi du matavimai, atitinkantys bandomųjų įtampų santykį 1:5. Tačiau vėl gi, gaunant prastus SV bandymo rezultatus, būtų prasminga kartoti IVM taikant PI, DAR arba DD matavimus atsižvelgiant į izoliacijos rūšį (senos-naujos kartos) ir tipą (vieno sluoksnio ar daugiasluoksnė) tam, kad būtų galima išgryninti izoliacijos suprastėjimo tikslią priežastį. Apibendrinant galima teigti, kad visi IVM metodai yra taikomi siekiant nustatyti tam tikrą Riz būklę ir skiriasi vienas nuo kito atlikimo trukme, Riz būklės vertinimais, megometro galimybėmis ir kitais antraeiliais parametrais, nurodytais 6 lentelėje.

IVM metodo parinkimas priklauso nuo tokių faktorių: kokia yra pradinė EM apvijų izoliacijos būklė, kuri nustatoma ST arba SV IVM metodais, kokia yra izoliacijos sudėtis ir izoliuojančių medžiagų kartos tipas. Todėl straipsnyje remiantis atliktu tyrimu, siūlomas išanalizuotų IVM metodų taikymo algoritmas, kuris yra pateiktas 7 paveiksle.





7 pav. Elektros mašinų apvijų izoliacijos varžos matavimo metodų taikymo algoritmas. Šaltinis: sudaryta autorių.
Fig.7. Algorithm for applying techniques to measure electrical machine winding insulation resistance. Source: compiled by authors

Remiantis algoritmu (7 pav.) galima išskirtinai taikyti visus megommetruose integruotus Riz varžos matavimo metodus.

Išvados

1. Eksploatavimo metu elektros mašinų apvijų izoliacija dėvėsi. Izoliacijos suprastėjimas būna dviejų rūšių. Natūralų nusidėvėjimą lemia cheminis užterštumas, drėgmė ir ultravioletinės spinduliuotės poveikis. Apvijų izoliacijos nusidėvėjimas pasireiškia dėl dielektriko viduje susidariusio elektrinio lauko poveikio, pačių apvijų aukštos temperatūros, taip pat dėl mašinų vibracijų.

2. Dažniausiai naudojamų integruotų įprastuose skaitmeniniuose matuokliuose elektros mašinų izoliacijos varžos matavimų metodų yra penki. Trumpiausias iš jų yra trumpalaikis DC įtampos matavimo metodas (ST). Šio metodo detalesne atmaina galima laikyti pakopinės įtampos metodą (SV). Nustatyta, kad jei ST ir SV metodais gauta izoliacijos varžos reikšmė kelia įtarimą, tai rekomenduojama izoliacijos būklės tolimesniam vertinimui taikyti DAR arba PI matavimo metodus, daugiasluoksnei apvijų izoliacijai tirti geriausiai taikyti DD matavimo metodą.

3. Atsižvelgiant į išanalizuotų straipsnyje dažniausiai naudojamų izoliacijos varžos matavimo metodų taikymo ypatumus bei rezultatų vertinimus yra pateiktas visų jų taikymo algoritmas.

Literatūra

1. Addo, E., Normanyo, E., Quarshie, L. (2021). The Effects of Temperature Rise on the Overall Lifespan of Three Phase Induction Motors. *International Journal of Mechatronics, Electrical and Computer Technology (IJMEC)*, Vol. 11(41), 5008-5018.
2. AEMC Instruments-Chauvin Arnoux Group. (2015). An Introduction to Insulation Resistance Testing. "Watts Current" technical bulletin, Issue 06, Summer 2015. Prieiga per internetą: <https://www.aemc.com/products/>
3. Andraschek, N., Wanner, A., Ebner, C., Riess, G. (2016). Mica/epoxy-composites in the electrical industry: applications, composites for insulation, and investigations on failure mechanisms for prospective optimizations. *Polymers* 8(5):201.
4. Armando, S. G., Sidelmo, M. S. (2020). Insulation failures prognosis in electric machines: preventive detection and time to failure forecast. *IET Electric Power Applications*, 14(6), 929-1117.
5. Cimino, A., Jenau, F., Staubach, C., Mashkin, A., Pohlmann, F. (2018). Analysis of Fault Detection in the Electrical Insulation System of Rotating Machines. In *Proceedings of the 2018 International Conference on Diagnostics in Electrical Engineering (Diagnostics)*, pp. 1-4.
6. Devarajan, G., Chinnusam, M., Kaliappan, L. (2020). Detection and classification of mechanical faults of three phase induction motor via pixels analysis of thermal image and adaptive neuro-fuzzy inference system, *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 12(5), pp. 1-12.



7. Dulskiy, E., Kruchek, V. and P Kolpahchyan, P. (2021), Comparative experimental studies of the main electrical parameters of electrical equipment insulation after drying by various methods. *Russian Electrical Engineering, Volume 92, pages 74–76.*
8. Faiz, J., Nejadi-Koti, H. and Valipour, Z. (2017). Comprehensive review on inter-turn fault indexes in permanent magnet motors, *IET Electric Power Applications, vol. 11, no. 1, pp. 142–156.*
9. Fluke Corporation. (2003, 2007). Insulation resistance testing. Prieiga per internetą: <https://docplayer.net/5079266-Insulation-resistance-testing.html>
10. Gomez, A., G., and Swapnil, M. (2023). Insulation Assessment Using Non-Invasive Techniques. *NETAWorld journal*, prieiga per internetą: <https://netaworldjournal.org/insulation-assessment-using-non-invasive-techniques/>
11. International Electrotechnical Commission. (2000). IEC 60270:2000 High-voltage test techniques - Partial discharge measurements.
12. International Electrotechnical Commission. (2018). IEC 60034-27-4:2018. Rotating electrical machines - Part 27-4: Measurement of insulation resistance and polarization index of winding insulation of rotating electrical machines. *IEEE Power & Energy Society, Electric Machinery Committee.*
13. Ji, Y., Giangrande, P., Zhao, W., Madonna, V., Zhang, H., Li, J., Galea, M. (2023), Investigation on combined effect of humidity–temperature on partial discharge through dielectric performance evaluation. *IET Science, Measurement & Technology, Volume 17, Issue 1, January, pp. 37 – 46.*
14. Logesh, K., Sivakumar, N., Viswanathan, V., Amit, G., Boon-Hee, S., Hung, D. N. (2020). Life Estimation of Electrical Machine using Aging Model. *IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. DOI: 10.1109/IECON43393.2020.9254606
15. Madhar, S., A., Mor, A., R., Mraz, P., Ross, R. (2021). Study of DC partial discharge on dielectric surfaces: Mechanism, patterns and similarities to AC. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 126, Part B, Article 106600.*
16. Madonna, V., Giangrande, P., Zhao, W., Zhang, H., Gerada, C., Galea, M. (2020). Electrical machines for the more electric aircraft: Partial discharges investigation. *IEEE Transactions on Industry Applications, 57(2), pp. 1389–1398.*
17. Sun, P., Sima, W., Jiang, X., Zhang, D., He, J., Ye, L. (2019). Review of accumulative failure of winding insulation subjected to repetitive impulse voltages. *High Voltage 4, 1–11.*
18. Terron-Santiago, C., Martinez-Roman, J., Puche-Panadero, R., Sapena-Bano, A. (2021). A Review of Techniques Used for Induction Machine Fault Modelling. *Sensors 21(14):4855. doi: 10.3390/s21144855.*
19. The Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2000). IEEE 43-2000:IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery. *IEEE Power & Energy Society, Electric Machinery Committee.*
20. Torkaman, H., Karimi, F. (2015). Measurement variations of insulation resistance/polarization index during utilizing time in HV electrical machines – A survey. *Elsevier. Measurement 59 (2015) 21–29.*
21. Verginadis, D., Antonino-Daviu, J.A., Karlis, A., Danikas, M.G. (2022). Determination of the Insulation Condition in Synchronous Generators: Industrial Methods and A Case Study. *IEEE Industry Applications Magazine, Volume: 28, Issue: 2, pp.67–77.*

Study of Insulation Resistance Measurement Methods for Rotating Electrical Machines

(Received in February, 2024; Accepted in March, 2024; Available Online from 10th of May, 2024)

Summary

The aim of the study is an overview of electrical machine insulation resistance measurement methods and an analysis of their application possibilities.

Electrical machine winding insulation deteriorates when the machine is in use. Deterioration of isolation might take two forms. Natural insulation ages due to UV light, humidity, and chemical pollution. The dielectric's generated electric field, the windings' high temperature, and machine vibrations all contribute to the wear-out of the insulation in the windings.

Conventional digital meggers come with five standard ways of measuring the insulating resistance of electrical devices. The short-time DC voltage measurement method (spot-test) is the shortest of them. The step voltage approach (SV) is a more detailed version of this technique. In cases where the insulation resistance value obtained by the ST and SV methods raises questions, it is possible to employ DAR or PI measurement methods for additional insulation condition assessment. It was discovered that the DD measurement method works best for looking into the multi-layer insulation of windings.

An algorithm for using the most widely used insulation resistance measurement techniques is presented, taking into consideration the features of their application that are examined in the article and the assessment of the outcomes.

