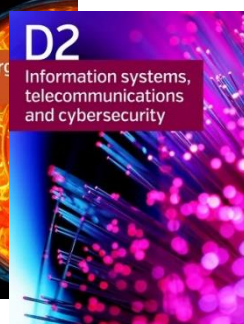
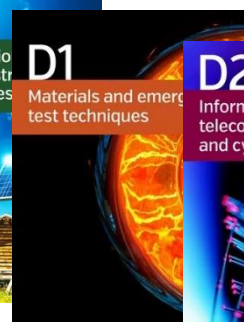
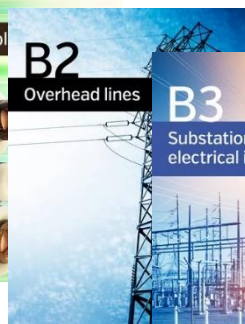
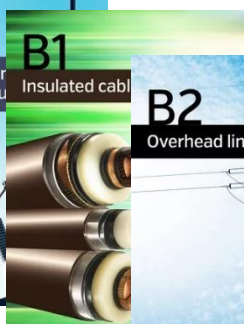
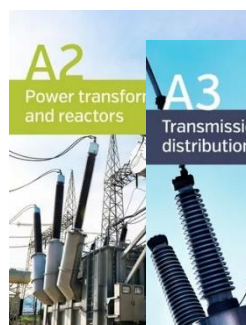
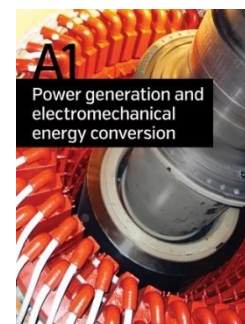


بروشور فنی ۹۱۸ TB مجله الکترا ۳۳۱

کمیتہ مطالعاتی ماشین های الکتریکی دوار و تولید برق
اندازه گیری ضریب اتلاف دی الکتریک روی سیم پیچ های استاتور



cigre
Iran



۱- مقدمه:

عمر سیستم عایقی، تعیین‌کننده‌ترین پارامتر عملکردی برای هر ماشین الکتریکی است. بهبود کیفیت این عامل به معنی افزایش طول عمر ماشین، کاهش هزینه‌های تعمیرات و نگهداری، افزایش قابلیت اطمینان و نهایتاً افزایش بازده اقتصادی ماشین می‌باشد. به طور کلی، پیری عایق الکتریکی یک فرآیند پیچیده‌ی چند عاملی از تنش‌های حرارتی، الکتریکی، محیطی و مکانیکی است که منجر به افزایش تلفات الکتریکی در عایق می‌شود.

هدف بروشور فنی شماره ۹۱۸، بررسی آزمایش ضریب اتلاف دی‌الکتریک (DDF) روی سیم‌پیچ‌های استاتور، بررسی مقادیر معمول ضریب اتلاف دی‌الکتریک سیم‌پیچ‌های استاتور نو و نیز در حال کار، ارزیابی اثربخشی این آزمایش و اینکه آیا این روش ارزش افزوده‌ای در فرآیند ارزیابی وضعیت عایق سیم‌پیچ استاتور ارائه می‌دهد یا خیر می‌باشد. این بروشور فنی به کاربر در تصمیم‌گیری برای استفاده از آزمایش مذکور به عنوان ابزاری مفید در ارزیابی وضعیت عایق سیم‌پیچ استاتور کمک خواهد کرد.

۲- ضریب اتلاف دی‌الکتریک (DDF)

اندازه‌گیری ضریب اتلاف دی‌الکتریک (DDF) که با نام تانژانت دلتا ($\tan\delta$) یا آزمایش ضریب توان نیز شناخته می‌شود، یک پارامتر بسیار مهم در یک سیستم عایق الکتریکی (EIS) است. از این روش در زمینه‌ی ماشین‌های الکتریکی دوار برای ارزیابی کیفیت تولید سیم‌پیچ‌های استاتور استفاده می‌شود. پارامتر مذکور نسبتی بین جریان مقاومتی و جریان خازنی در یک سیستم دی‌الکتریکی است. تغییرات آن در طول زمان می‌تواند نشانه‌ای از یک تغییر فیزیکی و یا وجود آلودگی یا رطوبت باشد.

طبق تعریف، ضریب اتلاف دی‌الکتریک، تانژانت زاویه دلتا (در ولتاژ، فرکانس و دمای از پیش تعیین‌شده) می‌باشد که در آن $\delta = 90^\circ - \varphi$ است و φ زاویه بین ولتاژ AC سینوسی اعمال شده به یک تک‌پورت الکتریکی (در نظریه مدار الکتریکی، یک جفت ترمینال که یک شبکه یا مدار الکتریکی را به یک مدار خارجی متصل می‌کنند) و جریان عبوری از این تک‌پورت است (شکل ۱). در این مورد، تک پورت نمایان‌گر سیم‌پیچ استاتور است.



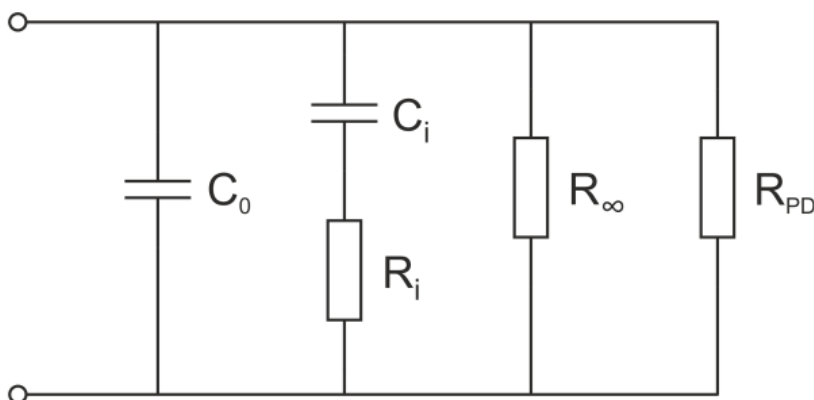
شکل ۱- دیگرام برداری ولتاژ و جریان به همراه زاویه تلفات

تلفات در یک پایانه برابر با $P = UI \cos \varphi$ است که φ زاویه بین ولتاژ U و جریان I است. هنگام وارد کردن زاویه δ ، فرمول به $P = UI \sin \delta$ تغییر می‌کند. معمولاً از مقدار $\tan \delta$ به عنوان معیاری برای اندازه‌گیری تلفات استفاده می‌شود و با یک پل اندازه‌گیری کلاسیک، $\tan \delta$ را می‌توان مستقیماً اندازه‌گیری کرد. تبدیل این $\tan \delta$ به $\sin \delta$ مطمئناً امروزه کار چندان سختی نیست، اما از آنجایی که برای مقادیر کم δ ، تفاوت بین $\tan \delta$ و $\sin \delta$ کمتر از دقت تجهیزات اندازه‌گیری است، معمولاً به $\tan \delta$ به جای $\sin \delta$ نگریسته می‌شود.

در جدول A.1 استاندارد IEC 60034-27-3 [1] و نیز استاندارد IEEE 286 [2]، رابطه بین ضریب توان ($PF = \cos \varphi$) و ضریب اتلاف ($DF = \tan \delta$) با جزئیات بیشتری بررسی شده است.

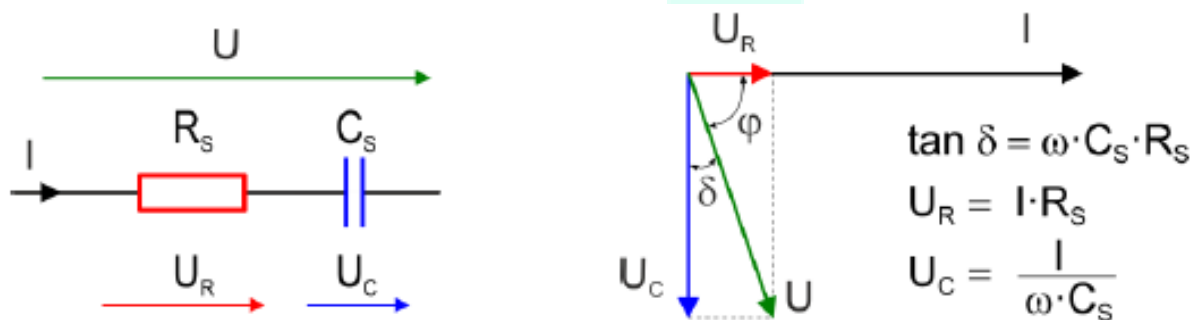
سیستم عایق‌بندی وابسته به ویژگی‌های مختلف موجود در سیستم است (از جمله تلفات عایقی). این مقوله می‌تواند با یک مدار الکتریکی معادل نمایش داده شود. در شکل ۲ که اقتباس شده از مدل Küchler [3] می‌باشد، ۴ عنصر معرفی شده‌اند:

- یک خازن ایده‌آل C_0 (بدون هیچ‌گونه تلفاتی) که نشان‌دهنده عایق ایده‌آل است.
 - ترکیبی از یک خازن C_i و یک مقاومت R_i که نشان‌دهنده تلفات قطبش ناشی از جابجایی بار در سیستم و تغییر در ظرفیت خازنی ناشی از اختلاف در گذردهی نسبی است.
 - یک مقاومت R_∞ که نشان‌دهنده تلفات هدایتی (مقاومت DC) است.
 - یک مقاومت به نام R_{PD} که نشان‌دهنده تلفات تخلیه (به دلیل تخلیه‌های جزئی داخلی و همچنین تخلیه‌های خارجی مانند کرونا) است.
- در یک تقریب، عناصر اول را می‌توان (کم و بیش) ثابت در نظر گرفت، در حالی که عنصر چهارم (R_{PD}) معمولاً نمی‌تواند ثابت لحاظ شود.

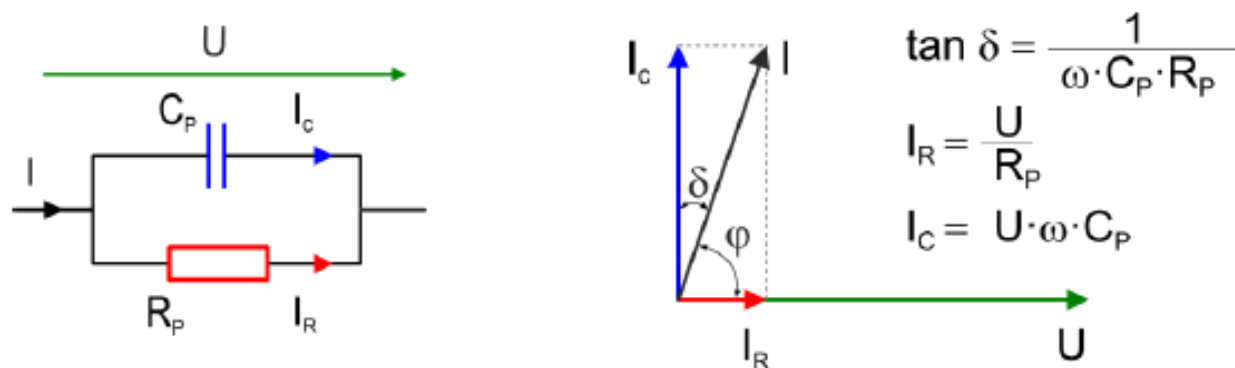


شکل ۲- نمودار مدار معادل ترکیبی با قابلیت تطبیق با مدل Küchler

هنگام مشاهده رفتار یک سیستم عایقی می‌توان یک مدار معادل ساده‌تر نیز تعریف کرد (یک مدار سری و یک مدار موازی). اولی شامل یک خازن و یک مقاومت متصل به صورت سری (شکل ۳) و دومی شامل یک خازن و یک مقاومت متصل به صورت موازی است (شکل ۴).



شکل ۳- نمودار مدار معادل سری و نمودار برداری یک سیستم عایق‌بندی با اتلاف



شکل ۴- نمودار مدار معادل موازی و نمودار برداری یک سیستم عایق‌بندی با اتلاف

اینکه کدام یک از این مدارهای معادل استفاده شود، به شرایط بستگی دارد، با این حال باید تأکید کرد که عناصر این مدارها معنای فیزیکی خاصی ندارند و صرفاً به عنوان نمایش ریاضی پدیده عمل می‌کنند. بنابراین، R_p با R_s برابر نیست و C_p با C_s برابر نیست.

۳- فاکتورهای مؤثر روی اندازه‌گیری تلفات عایقی

هنگام ارزیابی نتایج اندازه‌گیری ضریب اتلاف دی‌الکتریک توجه به این نکته مهم است که عوامل مؤثر متعددی می‌توانند بر مقادیر اندازه‌گیری شده تأثیر بگذارند. عوامل اصلی مؤثر در این مورد در جدول شماره ۱ آمده‌اند.

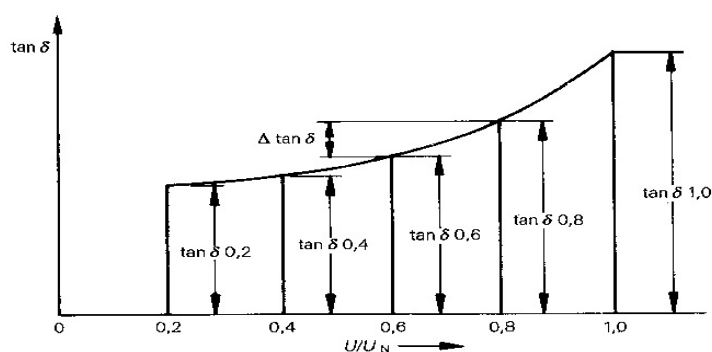
جدول ۱- عوامل موثر روی تلفات عایقی

خواص مواد عایق الکتریکی	طراحی سیستم عایق الکتریکی	فرآیند تولید عایق الکتریکی	فرآیند پیری عایق الکتریکی	تأثیرات محیطی یا خارجی در طول اندازه‌گیری
انواع نوار و میکا	لایه‌های مختلف عایق	نواربندی	حرارتی	دما
انواع رزین	لایه حفاظت کرونای داخلی (ICP)	اشباع	الکتریکی	آلودگی سطح سیم‌پیچ
انواع نوارهای درجه‌بندی تنش	لایه سطحی حفاظت کرونای خارجی (OCP)، مقاومت اهمی هسته استاتور	پخت	محیطی	رطوبت
	درجه بندی تنش یا محافظت در برابر کرونای انتهایی (ECP)	کیفیت بازپیچی سیم‌پیچ	مکانیکی، شامل ترمومکانیکی نیز می‌شود	فرکانس و هارمونیک‌ها
	قدرت میدان الکتریکی			نویز خارجی
	لایه‌های مرزی			
	نوع سیستم عایقی			

۴- قرائت‌های مختلف از ضریب اتلاف دی‌الکتریک

بررسی‌ها نشان داده‌اند که $\tan \delta$ به ولتاژ اعمال شده وابسته است. در طول سال‌ها و تحت تأثیر رویه‌های صنعتی مختلف، مقادیر کلیدی زیر تعریف شده و مورد استفاده قرار گرفته‌اند:

- $\tan \delta$ در ولتاژ پایین در ۲۰٪ از ولتاژ خط به خط
- $\tan \delta$ در ۲۵٪ از ولتاژ خط به زمین
- $\tan \delta$ در ولتاژهای شروع از ۲۰٪ ولتاژ زمین تا ولتاژ زمین (با گام‌های ۲۰٪ یا حتی ۱۰٪)
- $\tan \delta$ در ولتاژ خط به زمین
- $\Delta \tan \delta_{0.2 \max}$: حداکثر $\Delta \tan \delta$ در هر گام UN 0.2 - منحنی مربوطه در شکل ۵ آمده است.



شکل ۵- منحنی $\tan \delta$ نسبت به ولتاژ اعمالی

بزرگی دلتای تانژانت که توسط افزایش ولتاژ رخ می‌دهد، اغلب نشانه‌ی وجود فضای خالی در عایق است. از آنجایی که ضریب اتلاف دی‌الکتریک از یک ماده عایقی به نوع دیگر آن متفاوت است، ترکیب مواد مختلف به همراه فرآیند تولید بر این ضریب اثرگذار است. برخی از موادی که در گذشته و نیز در حال حاضر در سیم‌پیچ‌های ژنراتور استفاده می‌شوند، در جدول شماره ۲ و ۳ آورده شده‌اند.

جدول ۲- مواد عایقی که در حال حاضر در سیم‌پیچ‌های ژنراتور استفاده می‌شوند

پرک‌های میکا	نوار، پارچه یا لاک حاوی کربن برای لایه حفاظت کرونای داخلی و خارجی	فیلیم‌های پلی‌ایمید	رزین استر-ایمید	الیاف شیشه
کاغذ میکای مرغوب	نوار، پارچه یا لاک حاوی کاربید سیلیکون برای لایه تنظیم میدان انتهایی	رزین پلی‌استر غیر اشباع	رزین سیلیکون	رزین اپوکسی

جدول ۳- مواد عایقی که در گذشته در سیم‌پیچ‌های ژنراتور استفاده می‌شدند

پرک‌های میکا	نوار آزبست	فیلیم کاغذ سلولزی	آسفالت (قیر)
نوار پنبه‌ای	پارچه ابریشمی	لاستیک طبیعی/گوتا‌پرکا	رزین شلاک

با مقایسه جداول ۲ و ۳ مشاهده می‌گردد که پرک‌های میکا از گذشته تاکنون در ساخت سیم‌پیچ‌های ژنراتور استفاده می‌شوند. بدیهی است که با گذشت زمان از مواد با قابلیت عایقی مناسب‌تر در ساخت سیم‌پیچ‌های ژنراتور استفاده می‌گردد.

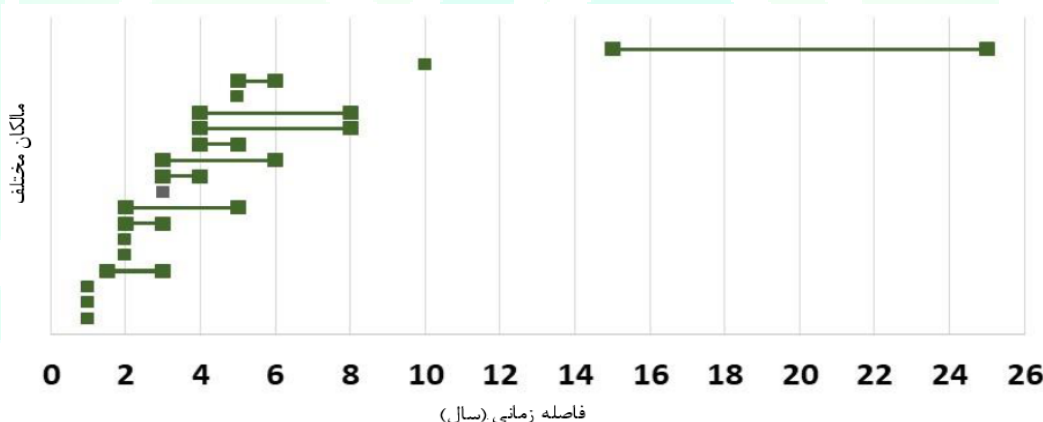
۵- پرسش‌نامه بین‌ذی‌نفعان

این بروشور فنی نتایج ۳ پرسش‌نامه را که جهت اندازه‌گیری ضریب اتلاف دی‌الکتریک سیم‌پیچ‌های استاتور در سطح بین‌المللی توزیع شده‌اند، ارائه می‌دهد. پرسش‌نامه‌های مذکور برای تولیدکنندگان تجهیزات (گروه A)، مالکان (گروه B) و نیز شرکت‌هایی که آزمایش ضریب اتلاف دی‌الکتریک را انجام می‌دهند (گروه C) ارسال شد. هر پرسش‌نامه به طور خاص و به تفکیک برای هر گروه تنظیم شده است. تیم تهیه‌کننده این بروشور، ۷۱ پرسش‌نامه تکمیل شده و ۴۴۶۶ نتیجه تست و آزمایش دریافت نمود. از این بین، ۱۷ پرسش‌نامه از سمت گروه A، ۲۹ پرسش‌نامه از سمت گروه B و ۲۵ پرسش‌نامه از سمت گروه C تکمیل شد. این آمار از سیم‌پیچ‌های استاتور ۶۶ تولیدکننده مختلف در ۳۲ کشور به دست آمده که منجر به ایجاد یک پایگاه داده قوی برای ژنراتورهایی با ولتاژ نامی بیشتر از ۶ کیلوولت گردید. میزان اطلاعات و نتایج اندازه‌گیری دریافتی به حدی بود که تصمیم گرفته شد اطلاعات در ۲ بروشور فنی تقسیم شود. این بروشور مربوط به بخش ۱ است که شامل برخی از فصل‌های مقدماتی و اطلاعات پیش‌زمینه در مورد ضریب اتلاف

دی‌الکتریک به عنوان یک پارامتر مشخصه مواد عایقی و همچنین در نظر گرفتن عوامل مؤثر، روش‌های اندازه‌گیری، تجهیزات آزمایش و استانداردهای بین‌المللی است. همچنین در یک بخش اصلی از این بروشور، مروری بر پاسخ‌های پرسش‌نامه نیز ارائه می‌گردد. تجزیه و تحلیل نتایج اندازه‌گیری سیم‌پیچ استاتور در بخش ۲ این بروشور گنجانده شده است. پاسخ‌های گروه B به عنوان یک گروه مهم که بیشتر با ژنراتور در ارتباط هستند، در بخش‌های ۱-۵، ۲-۵ و ۳-۵ آمده است.

۱-۵- فاصله زمانی بین اندازه‌گیری‌های ضریب اتلاف دی‌الکتریک

از گروه B در مورد سیم‌پیچ ژنراتورهای در حال کار پرسیده شد که چه فاصله زمانی بین اندازه‌گیری‌ها لحاظ می‌شود. ۲۲ عدد از این گروه (۷۶٪) به این سوال پاسخ دادند. آن‌ها به طور کلی به یک پهنای باند مشخص که استفاده می‌شد، اشاره کردند.



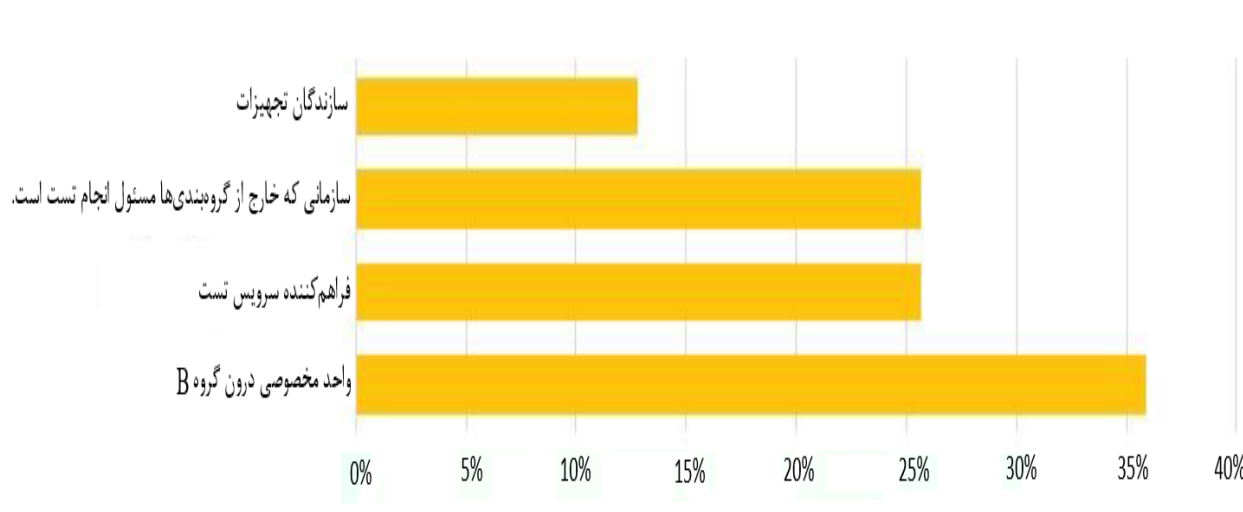
شکل ۶- فاصله زمانی بین اندازه‌گیری‌های DDF (بر حسب سال)

همان‌طور که در شکل شماره ۶ مشخص است، ۴ عدد از گروه B دوره زمانی ارائه نکردند. اما برای توجیه، پاسخ‌های ذیل را ارائه دادند:

- بسته به شرایط
- ضریب اتلاف دی‌الکتریک گاهی اوقات در اسکوپ کاری سازنده تجهیز است.
- در طول تعمیرات توربین

۲-۵- چه کسی ضرایب اتلاف دی‌الکتریک را اندازه می‌گیرد؟

در پاسخ به این سوال از مالکان که چه کسی اندازه‌گیری ضرایب اتلاف دی‌الکتریک سیم‌پیچ‌های استاتور در حال بهره‌برداری را انجام می‌دهد؟، ۲۵ مالک پاسخ شفاف ارائه دادند. توزیع پاسخ‌ها در نوع خود بسیار جالب توجه است و در شکل ۷ مشخص است.

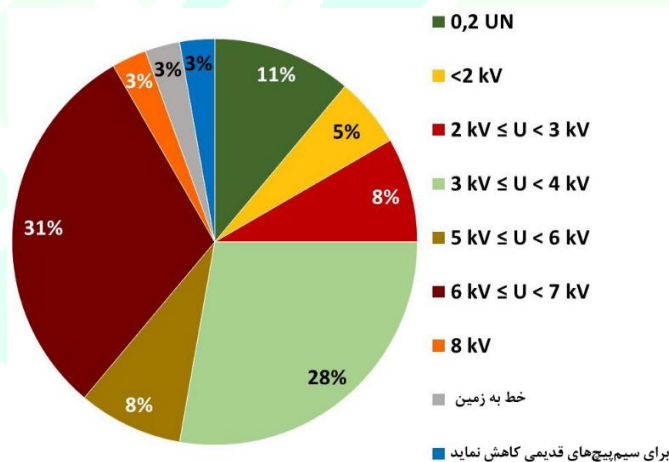


شکل ۷- مسئولیت اندازه‌گیری ضرایب اتلاف دی‌الکتریک

با توجه به شکل ۷، بیشترین سهم مربوط به واحد مخصوصی درون خود گروه مذکور است که متولی انجام تست است.

۵-۳- حداقل ولتاژ اعمالی جهت اندازه‌گیری ضریب اتلاف دی‌الکتریک

با توجه به شکل ۸ مشاهده می‌شود که ولتاژهای بین ۶ تا ۷ کیلوولت سهم بیشتری در توزیع حداقل ولتاژ اعمالی به سیم‌پیچ‌های ژنراتور دارند. آیتم‌های "مقادیر ۸ کیلوولت"، "ولتاژ خط به زمین" و "کاهش ولتاژ برای سیم‌پیچ‌های قدیمی" کمترین سهم را دارند.



شکل ۸- توزیع حداقل ولتاژ اعمالی جهت تست DDF

کمیته مطالعاتی ماشین‌های الکتریکی دوار و تولید برق SC A1
سیگره ایران

مردادماه ۱۴۰۴



مرجع اصلی: CIGRE Electra No. 331 - دسترسی به مراجع از طریق سایت <https://www.e-cigre.org>

تهیه کننده: سیگره ایران - کمیته مطالعاتی SC A1 - آقای مهندس حسین زمان پور ابیانه
برای کسب اطلاعات تکمیلی با دبیرخانه سیگره ایران تماس بگیرید.

این گزارش شامل خلاصه ای برای معرفی یکی از برشورهای فنی منتشر شده توسط سیگره بین الملل و منبع معرفی آن، مجله الکتر می باشد.

Electra, reprinted/translated with permission from CIGRE, © 2025

کمیته های مطالعاتی سیگره بین الملل	کمیته های مطالعاتی متناظر سیگره ایران
---------------------------------------	--

Group A – Equipment	
A1 Power Generation and Electromechanical Energy Conversion	ماشین های الکتریکی دوار و تولید برق
A2 Power transformers and reactors	ترانسفورماتورها و راکتورها
A3 Transmission and distribution equipment	تجهیزات انتقال و توزیع
Group B – Technologies	
B1 Insulated cables	کابل های عایق شده
B2 Overhead lines	خطوط انتقال
B3 Substations and electrical installations	پست های فشار قوی
B4 DC systems and power electronics	سیستم های DC و الکترونیک قدرت
B5 Protection and automation	حفاظت و اتوماسیون
Group C – Systems	
C1 Power system development and economics	توسعه سیستم قدرت و جنبه های اقتصادی
C2 Power system operation and control	سیستم بهره برداری و کنترل
C3 Power System Sustainability and Environmental Performance	---
C4 Power system technical performance	عملکرد فنی سیستم های قدرت
C5 Electricity markets and regulation	بازار برق و تنظیم گری
C6 Active distribution systems and distributed energy resources	شبکه های توزیع فعال و منابع انرژی توزیع شده
Group D – New Materials and IT	
D1 Materials and emerging test techniques	---
D2 Information Systems Telecommunications and Cybersecurity	مخابرات و فناوری اطلاعات



با ما در ارتباط باشید:



دبیرخانه سیگره ایران:
تهران - خیابان ولیعصر - بالاتر از میدان ونک - خیابان عطار - پلاک ۱۲ - شرکت موننکو ایران
شماره تماس: ۰۲۱-۸۱۹۶۱ ایمیل: cigre@monencogroup.com وب سایت: www.cigreiran.com