^IGS-R-EL-027(0)	اسفند ۹۴
Recommended Practice	دستورالعمل پیشنهادي

شرکت ملی گازایران

مدیریت پژوهش و فنآوری

امورتدوین استانداردها

IGS

این دستورالعمل با توجه به تجربیات عملی و فنی کارشناسان شرکت ملی گاز تهیه گردیده و استفاده از آن به مدت ۱ سال از زمان انتشار الزامی نبوده و صرفاً جهت راهنمایی می باشد. از کلیه کاربران محترم این دستورالعمل درخواست می گردد نظرات اصلاحی خود را جهت بررسی به امور تدوین استانداردها اعلام نمایند.بدیهی است پس از زمان مقرر اقدامات مقتضی بمنظور اخذ مصوبه ه .م .م جهت الزامی نمودن آن ، صورت خواهد پذیرفت.

GasPlus.ir

آزمونهای میدانی و ارزیابی عایق سیستمهای کابل قدرت(نو و کارکرده)

Field Testing and Evaluation of the Insulation of Power Cable Systems (new and aged)

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
1- هدف	3
2- استانداردهای مرجع	4
3- تعاریف	6
4- ایمنی	8
4-1- شیوه‌های ایمن سازی	8
4-2- زمین کردن	9
5- آزمون عایقی بر روی سیستم کابل	11
5-1- هدف از انجام آزمون عایقی بر روی سیستم کابل	11
5-2- آزمون‌های متداول سیستم عایقی کابل	12
5-3- سطوح ولتاژی کابل‌های قدرت	13
5-4- انتخاب نوع آزمون در شرایط خاص	14
5-5- دوره‌های زمانی انجام آزمون نگهداری	15
5-6- سیستم عایق یک کابل	16
5-7- مراحل انجام آزمون‌های کابل	16
5-8- دشارژ سیستم کابل	17
5-9- ثبت اطلاعات آزمون	18
5-10- بررسی تاثیر شرایط محیطی بر روی نتایج حاصل از آزمون	18
5-11- انجام آزمون در شرایطی که امکان جداسازی کابل از تجهیز متصل به آن نباشد	19
6- آزمون اندازه‌گیری مقاومت عایقی (***IR***[1])	19
6-1- نحوه سیم‌بندی و اتصال دستگاه اندازه‌گیری مقاومت عایقی به کابل قدرت	19
6-2- آزمون پذیرش مقاومت عایقی کابل	21
6-3- پارامترهای تاثیر گذار بر روی مقدار اندازه‌گیری شده مقاومت عایقی کابل	22
6-4- ضریب اصلاح دمایی در آزمون مقاومت عایقی کابل	23
6-5- آزمون نگهداری مقاومت عایقی کابل	25
6-6- ولتاژ اعمالی به کابل در آزمون نگهداری *IR*	26
6-7- شاخص پلاریزاسیون (یا قطبیدگی) *PI*[2]	27
6-8- آزمون *IR* بر روی عایق پوشش یا غلاف بیرونی کابل	27

[1] Insulation resistance

[2] Polarization Index

GasPlus.ir

9-6- بررسی محدودیت‌ها در آزمون اندازه‌گیری مقاومت عایقی	28
10-6- پروفیل مقاومت عایقی (IRP[3])	28
7- آزمون ولتاژ بالای **AC**[4] موسوم به **AC-Hipot**[5]	29
1-7- آزمون پذیرش	29
2-7- آزمون نگهداری برای کابل‌های شیلددار	29
8- آزمون ولتاژ بالای **DC**[6] موسوم به **DC-Hipot**	31
9- آزمون ولتاژ **AC** با فرکانس بسیار پایین موسوم به **VLF**[7]	33
1-9- استاندارد و دستورالعمل نحوه انجام تست	33
2-9- آزمون تحمل ولتاژ عایقی VLF	34
1-2-9- شیوه انجام آزمون	35
2-2-9- اتصال کابل به دستگاه VLF	36
3-9- آزمون تشخیصی VLF	37
1-3-9- شیوه انجام آزمون	39
2-3-9- معیارهای ارزیابی برای کابل‌های کارکرده/کهنه	39
3-3-9- نحوه محاسبه شاخص‌های ارزیابی	40
4-3-9- حالت‌های مختلف وضعیت کابل	41
10- آزمون تخلیه جزئی (**PD**[8]) آنلاین و آفلاین	43
11- آزمون عکس برداری مادون قرمز یا ترموگرافی	44
پیوست 1- آزمون‌های عایقی برای سیستم‌های کابل با عایق کاغذی	45
پیوست 2- شناسنامه کابل	46
پیوست 3- برگه تست شیت آزمون اندازه گیری مقاومت عایقی (**IR**) با اعمال ولتاژ **DC**	48
پیوست 4- برگه تست شیت آزمون با ولتاژ **AC** در فرکانس بسیار پایین موسوم به **VLF**	50

GasPlus.ir

[3] Insulation resistance profiling

[4] Alternating current

[5] High potential voltage

[6] Direct current

[7] Very low frequency

[8] Partial discharge

1- هدف[9]

این استاندارد به منظور انجام آزمون و ارزیابی عایقی کابل‌های قدرت در سطوح مختلف ولتاژ مورد نیاز شرکت ملی گاز ایران تا ولتاژ حداکثر $33\ \mathrm{kV}$ تدوین شده است.

این استاندارد کابل‌های با عایق پلیمری و لاستیکی از نوع اکسترود شده (تزریقی) و عایق کاغذی و ورقه ورقه‌ای را در بر گرفته است.

آزمون‌های مورد اشاره در این استاندارد مربوط به مرحله بهره‌برداری و نگهداری از تاسیسات بوده و شامل آزمون‌های کارخانه‌ای[10] نمی‌شود.

GasPlus.ir

[9] scope

[10] Factory tests

2- استانداردهای مرجع[11]

این استاندارد بر پایه استانداردها و مراجعی که در زیر لیست شده‌اند تدوین شده است:

2.1. IEEE Std 400(2012), IEEE Guide for Field Testing and Evaluation of the Insulation of Shielded Power Cable Systems Rated 5 kV and Above.

2.2.IEEE Std 400.1(2007), IEEE Guide for Field Testing of Laminated Dielectric, Shielded Power Cable Systems Rated 5 kV and Above with High Direct Current Voltage.

2.3.IEEE Std 400.2(2013), IEEE Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Using Very Low Frequency (VLF) (less than 1 Hz).

2.4.IEEE Std 400.3(2006), IEEE Guide for Partial Discharge Testing of Shielded Power Cable Systems in a Field Environment.

2.5.IEEE Std 43(2013), IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Electric Machinery.

2.6.IEEE Std 433(2009), IEEE Recommended Practice for Insulation Testing of AC Electric Machinery with High Voltage at Very Low Frequency.

2.7.IEEE Std 525(2007), IEEE Guide for the Design and Installation of Cable Systems in Substations.

2.8.ANSI/NETA ATS-2013, Standard for Acceptance Testing Specifications for Electrical Power Equipment and Systems.

2.9.ANSI/NETA MTS(2011), Standard for Maintenance Testing Specifications for Electrical Power Equipment and Systems.

2.10.“IEC 60502.4(2010), Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV (Um = 1,2 kV) up to 30 kV (Um = 36 kV) – Part 4: Test requirements on accessories for cables with rated voltages from 6 kV (Um = 7,2 kV) up to 30 kV (Um = 36 kV).”

2.11.IEC 60060.3(2006), High-Voltage Test Techniques - Part 3: Definitions and Requirements for On-Site Testing.

2.12.IEC 60502.1(2009), Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV (Um = 1,2 kV) up to 30 kV (Um = 36 kV) - Part 1: Cables for rated voltages of 1 kV (Um = 1,2 kV) and 3 kV (Um = 3,6 kV).

[11] Normative reference

GasPlus.ir

2.13.IEC 60502.2(2005)[12], Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV (U_m = 1,2 kV) up to 30 kV (U_m = 36 kV) - Part 2: Cables for rated voltages from 6 kV (U_m = 7,2 kV) up to 30 kV (U_m = 36 kV).

2.14.IPS-E-EL-100.1(2012)**.** Engineering Standard For Electrical System Design (Industrial And Nonindustrial)

2.15.IPS-M-EL-271.2.(2014) **,** MATERIAL AND EQUIPMENT STANDARD FOR LOW VOLTAGE CABLES AND WIRES

2.16.IPS-M-EL-272.2.2014 , MATERIAL AND EQUIPMENT STANDARD FOR MEDIUM AND HIGH VOLTAGE POWER CABLES

2.17.IPS-I-EL-217(1)(2012), Inspection Standard for Pre commissioning Electrical Tests.

2.18.Nexans, “Insulation Resistance Testing of Low Voltage Cables in the Field”

2.19.Megger, “A Guide to Diagnostic Insulation Testing Above 1 kV”.

2.20.Megger, “A Stitch in Time: The Complete Guide to Electrical Insulation Testing”.

GasPlus.ir

[12] ویرایش سوم این استاندارد در سال 2014 میلادی منتشر شده است.

3- تعاریف

3-1-ولتاژ نامی کابل: هر کابل قدرت دارای سه ولتاژ نامی است که به صورت U_0/U (U_m) نمایش داده شده و به صورت زیر تعریف می‌شوند:

- U_0 **ولتاژ نامی کابل در فرکانس قدرت مابین هادی فاز و شیلد کابل (ولتاژ فاز به زمین)**
- U **ولتاژ نامی کابل در فرکانس قدرت مابین هادی یک فاز و هادی فاز دیگر (ولتاژ فاز به فاز)**
- U_m **بیشترین مقدار ولتاژ سیستم برای تجهیزاتی که ممکن است مورد استفاده قرار گرفته باشند.**

3-2-سیستم کابل[13]: مجموعه‌ای از یک یا چند تکه کابل به همراه اتصالاتی چون سرکابل‌ها و مفصل‌ها را سیستم کابل گویند.

3-3-عایق اکسترود شده[14]: عایق‌هایی نظیر PE[15]، XLPE[16]، TRXLPE[17]، EPR[18] و غیره که توسط پروسه اکستروژن (یا تزریق) ساخته می‌شوند.

3-4-عایق ورقه ورقه‌ای[19]: عایق‌هایی نظیر PILC[20]، MIND[21] و غیره که به صورت لایه لایه یا ورقه‌ای ساخته می‌شوند.

3-5-کابل شیلددار[22]: یک کابل که در آن یک هادی عایق شده توسط یک پوشش هدایت کننده[23] در بر گرفته شده است.

3-6-کابل نو، کارکرده وکهنه[24]: از نقطه نظر بهره‌برداری، در این استاندارد یک کابل تا زمانی که در سرویس قرار نگرفته باشد نو محسوب شده و در غیر اینصورت کارکرده نامیده می‌شود. همچنین، به کابلی که بیش از 5 سال از زمان بهره‌برداری و در سرویس قرار گرفتن آن گذشته باشد کابل کهنه اطلاق می‌شود.

---

[13] Cable system

[14] Extruded dielectrics

[15] Polyethylene

[16] Cross linked polyethylene

[17] Tree retardant cross linked polyethylene

[18] Ethylene propylene rubber

[19] Laminated dielectrics

[20] Paper insulated lead covered

[21] Mass impregnated non draining

[22] Shielded cable

[23] پوشش هدایت کننده (conducting envelope) می‌تواند از جنس یک هادی رسانا مانند مس یا آلومینیوم و یا یک پلیمر نیمه هادی باشد.

[24] New، aged and old cable

GasPlus.ir

3-7-جریان جذبی[25] (I_A): یکی از مولفه‌های جریان عبوری از عایق، تحت شرایطی است که به آن ولتاژ اعمال شده باشد. این مولفه جریانی ناشی از پدیده قطبی شدن مولکول‌های عایق بوده و از لحظه اعمال ولتاژ با گذشت زمان از یک مقدار نسبتا بزرگ به سمت صفر کاهش می‌یابد. مقدار این مولفه به نوع و شرایط عایق بستگی دارد.

3-8-مقاومت عایقی[26] (IR_t): توانایی یک عایق الکتریکی در مقاومت کردن در مقابل عبور جریان از خود زمانی که به آن ولتاژ اعمال شده باشد را گویند. مقدار آن از تقسیم ولتاژ اعمالی به عایق بر جریان عبوری از آن پس از گذشت زمان t از شروع اعمال ولتاژ بدست می‌آید که می‌بایست برای دمای $40^{\circ}C$ اصلاح شود. زمان t معمولا 1 دقیقه (IR_1) و 10 دقیقه (IR_{10}) می‌باشد با این حال مقادیر دیگر هم می‌توانند استفاده شوند. در صورتیکه زمان‌های t_1 و t_2 با اعدادی بین 1 تا 10 نشان داده شوند منظور دقیقه و در صورتیکه با عدد 15 و یا بزرگتر نشان داده شوند منظور ثانیه هستند.

3-9-شاخص پلاریزاسیون (قطبیدگی)[27] ($P.I._{t2/t1}$): معیاری است برای ارزیابی کیفیت یک عایق و عبارت است از نسبت مقدار مقاومت عایق پس از گذشت زمان t_2 به مقدار مقاومت عایق پس از گذشت زمان t_1 (توجه شود که t_1 همواره کوچکتر از t_2 انتخاب می‌شود). در نتیجه این شاخص بدون واحد است. اگر زمان‌های t_1 و t_2 داده نشده باشند به ترتیب برابر 1 و 10 دقیقه در نظر گرفته می‌شوند. اما در صورتیکه این زمان‌ها با اعدادی بین 1 تا 10 نشان داده شوند منظور دقیقه و در صورتیکه با عدد 15 و یا بزرگتر نشان داده شوند منظور ثانیه هستند (مثلا $P.I._{60/15}$ به معنی IR_{60s}/IR_{15s} است).

3-10-آزمون[28]: در این استاندارد چند نوع آزمون مختلف در نظر گرفته شده است:

3-10-1-آزمون نصب[29]: یک نوع آزمون میدانی است که بر روی یک کابل نو و درست پس از نصب آن و قبل از اتصال سرکابل و مفصل به آن انجام می‌شود.

3-10-2-آزمون پذیرش[30]: یک نوع آزمون میدانی است که بر روی کابل نو درست پس از نصب کابل و اتصال سرکابل و مفصل به آن و قبل از در مدار قرار گرفتن و بهره‌برداری از آن انجام می‌شود.

3-10-3-آزمون نگهداری[31]: یک نوع آزمون میدانی است که بر روی کابل‌هایی که در حال بهره‌برداری هستند انجام می‌شود.

3-11-دمای نقطه شبنم[32] (Td): دمایی است که هوای مرطوب برای آنکه به حد اشباع برسد، بایستی تا آن دما سرد شود. در دمای پایین‌تر از این دما کل آب موجود در هوا تقطیر خواهد شد. آب تقطیر شده چنانچه بر روی سطح یک شی جامد تشکیل شود شبنم نامیده می‌شود.

---

[25] Absorption current

[26] Insulation resistance

[27] Polarization index

[28] Test

[29] Installation test

[30] Acceptance test

[31] Maintenance test

GasPlus.ir

4- ایمنی[33]

4-1- شیوه‌های ایمن سازی[34]

ایمنی پرسنل در هنگام انجام تمامی آزمون‌هایی که در این استاندارد بررسی شده‌اند دارای اهمیت بسزایی است. تمامی کابل‌ها و تجهیزات تحت تست الزاماً می‌بایست از تغذیه اصلی قطع شده و از سیستم به نحو مناسب ایزوله شوند، مگر در شرایط خاص و با رعایت دستورالعمل‌های مربوطه و دریافت مجوزهای لازم. همواره شیوه‌های ایمن‌سازی مناسبی می‌بایست بکار برده شوند. شیوه‌های ایمن‌سازی الزاماً می‌بایست شامل موارد زیر باشند (تنها محدود به این موارد نمی‌شوند):

دستورالعمل‌های کاربردی بهره‌برداری ایمن در سطح شرکت ملی گاز ایران، استانداردهای ملی و بین‌المللی، مانند:

1.National Electrical Safety Code (NESC)

2.IEEE Std 510, IEEE Recommended Practices for Safety in High Voltage and High Power Testing.

3.NFPA 70E, Standard for Electrical Safety in the Workplace.

4.ANSI/NETA ATS-2013, Standard for Acceptance Testing Specifications for Electrical Power Equipment and Systems (Section 7.3.3: Cables, Medium and High Voltage).

5.ANSI/NETA MTS-2011, Standard for Maintenance Testing Specifications for Electrical Power Equipment and Systems (Section 7.3.3: Cables, Medium and High Voltage).

6.دستورالعمل‌های مربوط به حفاظت فیزیکی از لوازم و وسایل شرکت ملی گاز ایران

7.دستورالعمل وسایل و تجهیزات حفاظت فردی در شرکت ملی گاز ایران

پیش از انجام هرگونه تستی فاصله عایقی مجاز[35] برای تجهیزات مختلف بر اساس ولتاژ آزمون و ولتاژ تجهیزات برقدار مجاور می‌بایست تعیین شود:

1) **در سرهای انتهایی سیستم کابل موارد زیر در نظر گرفته شود: (1) سرهای انتهای کابل می‌بایست از هرگونه رطوبت و آلودگی تمیز شوند. (2) در حین آزمون حداقل فاصله عایقی مجاز(فاصله هوایی) بین سر هادیها و هادیها با زمین رعایت گردد. (3) هر موقع که ولتاژ اعمالی به کابل قطع شده است و کابل تحت آزمون نیست، می‌بایست آن را زمین کرد. (4) سرهایی از کابل که دور از محل انجام آزمون هستند می‌بایست با استفاده از علائم مناسبی، انجام یک تست ولتاژ بالا بر روی آن‌ها هشدار داده شود.**

---

[32] Dew point temperature

[33] Safety

[34] مطالب این بخش برگرفته از استاندارد IEEE Std 400.2-2013 بخش 4.1 در صفحه 5 و NFPA 70E می‌باشد.

[35] Clearance

GasPlus.ir

جدول(1) حداقل فواصل عایقی مجاز هوا

ردیف	سطح ولتاژ	حداقل فاصله هوایی مجاز
1	≤ 300V	1mm (0ft0.03in.)
2	> 300V≤750V	2mm (0ft0.07in.)
3	>750V≤2kV	5mm (0ft0.19in.)
4	>2kV≤15kV	39mm (0ft1.5in.)
5	>15kV≤36kV	161mm (0ft6.3in.)
6	>36kV≤48.3kV	254mm (0ft10.0in.)
7	>48.3kV≤72.5kV	381mm (1ft3.0in.)
8	>72.5kV≤121kV	640mm (2ft1.2in.)
9	>138kV≤145kV	778mm (2ft6.6in.)
10	>161kV≤169kV	915mm (3ft0.0in.)

2) در صورتی که کابل تحت تست با استفاده از یک کلید قدرت از مابقی سیستم ایزوله شده باشد، می‌بایست آن کلید قدرت در مقابل اعمال ولتاژ آزمون (DC و یا AC) به کابل از یک طرف و ولتاژ بهره‌برداری طرف دیگر کلید دارای تحمل الکتریکی باشد.

3) زمانی که از فاصله هوایی بعنوان عایق استفاده می‌شود، مانند وضعیتی که سرکابل از انتهای کابل جدا شده است، فاصله هوایی باید به اندازه‌ای باشد که ایزولاسیون بین ولتاژ آزمون اعمالی به کابل و ولتاژ بهره‌برداری اعمالی به تجهیزات الکتریکی مجاور برقرار باشد.

4) کلیه تجهیزات کمکی و فرعی متصل به سیستم کابل مانند صاعقه‌گیر، موتور و .... باید در هنگام آزمون از آن جدا شوند مگر در موارد خاص که در این صورت باید مجوزهای مربوطه اخذ گردد.

در انتهای پروسه انجام یک تست ولتاژ بالا بر روی کابل، توجه به نکات زیر توصیه می‌شود:

1) کابل‌ها و سیستم‌های کابل و تجهیزات آزمون دشارژ شوند. دشارژ کردن کابل تا زمانیکه این عمل تکمیل شود باید به دقت پایش گردد.

2) ملزومات اتصال به زمین کابل و تجهیزات آزمون می‌بایست حفظ شود تا از وقوع پدیده شارژ مجدد کابل در اثر خاصیت خازنی و خاصیت جذبی دی‌الکتریک[36] جلوگیری شود.

4-2- زمین کردن[37]

سیستم‌های کابل می‌توانند از طریق اتصال هادی و شیلد فلزی آن به زمین، دشارژ شوند. در صورتیکه از پیوستگی شیلد فلزی کابل مطمئن نیستید سر دیگر شیلد فلزی را نیز زمین کنید.

[36] Dielectric absorption

[37] مطالب این بخش برگرفته از استاندارد IEEE Std 400.2-2013 بخش 4.2 در صفحه 6 می‌باشد.

GasPlus.ir

در هنگام تست، استفاده از یک سیستم زمین منفرد در محل آزمون توصیه می‌شود. شیلد فلزی کابل به زمین سیستم متصل شود. اگر در زمان انجام آزمون این اتصال از بین رفته و یا در وضعیت بدی قرار دارد، باید ترمیم شده و یا تعویض گردد. یک کابل زمین ایمن می‌بایست بدنه تمامی تجهیزات آزمون را به زمین سیستم متصل کند. تمامی بخش‌های فلزی تجهیزات می‌بایست به نقطه زمین مشترک همبندی شوند. اگر تجهیز آزمون از نوع ولتاژ بالا است، باید از یک کابل زمین ایمن خارجی برای اتصال کابل تحت تست به زمین سیستم استفاده شود. این کابل می‌بایست تحمل هدایت جریان اتصال کوتاه را در هنگام آزمون داشته باشد. زمانیکه اتصالات تجهیز آزمون به کابل تحت تست متصل شدند، این زمین ایمن را می‌توان جدا کرد و تست را آغاز نمود.

اگر در تجهیز آزمون استفاده از یک زمین محلی پیشنهاد و یا توصیه شده است، با هدف داشتن یک پتانسیل زمین منفرد قابل قبول می‌بایست این زمین را به زمین سیستم متصل کنید.

در اجرای اتصالات تجهیزات آزمون به زمین مراقبت‌های لازم صورت بگیرد به گونه‌ای که از وقوع هرگونه قطع شدگی احتمالی آن جلوگیری شود. پیشنهاد می‌شود تا کلمپ‌های زمین قابل حمل و ملحقات اتصال به زمین طبق استاندارد IEC 61230 ساخته و آزموده شوند.

GasPlus.ir

5- آزمون عایقی بر روی سیستم کابل

تمامی کابل‌های قدرت در طول عمر بهره‌برداری خود در معرض انواع تنش‌های حرارتی، الکتریکی و مکانیکی قرار می‌گیرند که در نتیجه آن، مواد عایق کابل دچار یک فرآیند پیرشدگی تدریجی می‌شود. یکی از شناخته شده‌ترین پدیده‌هایی که موجب پیرشدگی عایق‌هایی نظیر پلی اتیلن (PE) و پلی اتیلن کراس لینک (XLPE) می‌شود، پدیده تشکیل درخت آبی[38] و درخت الکتریکی[39] است. پیرشدن عایق به معنی تنزل کیفیت یا به عبارت دیگر کهنه شدن کابل است. وقتی یک کابل کهنه می‌شود، دیگر خصوصیات فیزیکی یک کابل نو را ندارد. در واقع با کاهش استقامت الکتریکی عایق کابل، احتمال و خطر وقوع شکست در کابل افزایش می‌یابد.

5-1- هدف از انجام آزمون عایقی

مهمترین هدف از انجام آزمون عایقی بر روی یک سیستم کابل، سنجش و ارزیابی استقامت عایقی آن در برابر ولتاژی مشابه با ولتاژ بهره‌برداری آن است. تجربیات و آزمایشات متعدد نشان داده است که برای تجهیزات AC، ولتاژ متناوب بهترین نوع ولتاژ جهت تست اینگونه از تجهیزات است. به همین دلیل کارخانه‌های سازنده تجهیزات برقی در موقع ساخت این گونه وسایل، از این نوع ولتاژ برای تست تجهیزات تولیدی خود استفاده می‌کنند. با این حال برخی از مشکلات در راه استفاده از ولتاژ متناوب مانند نیاز به داشتن توان بالا برای تجهیزات آزمون به منظور شارژ خازنی تجهیزات برقی به ویژه کابل‌ها، استفاده از انواع دیگر ولتاژ نظیر ولتاژ DC را رواج داده است. این در حالیست که بر اساس استانداردهای معتبر بین‌المللی و جهانی مانند IEEE Std 400 استفاده از ولتاژ DC برای کابل‌های ترموپلاستیکی مضر بوده و طبق تجربیات استفاده از ولتاژ مستقیم جهت تست کابل‌های پلیمری برق به معنای تخریب ناخواسته آن‌ها است که عملا کاربر هیچ گونه نقشی در آن ندارد.

بنابراین یافتن شیوه‌های جدید تست کابل که بتواند میزان آسیب‌پذیری آن‌ها را به حداقل ممکن برساند و طول عمر این سرمایه ملی را افزایش دهد یکی از اهداف اساسی تدوین این استاندارد است. در این راستا تمام تلاش بر این است که در هنگام آزمون موارد زیر رعایت شود:

1. تست عایقی بر اساس اصول علمی شناخته شده صورت پذیرد.
2. از تجربه کاربران در برنامه آزمون‌ها استفاده شود.
3. در هنگام انجام آزمون خسارتی به بخش‌های سالم کابل وارد نشود.
4. مدت زمان تست با دلایل و مدارک مستند مشخص باشد.
5. در هنگام انجام آزمون تنها نقاط معیوب کابل دچار شکست شوند و سایر نقاط سالم باقی بمانند.
6. عملیات تست عایقی صرفا به خود کابل محدود نشده و علاوه بر آن عناصر مرتبط با آن (مفصل و سرکابل) نیز مورد بررسی دقیق قرار گیرند.

[38] Water treeing

[39] Electrical treeing

GasPlus.ir

5-2- آزمون‌های متداول سیستم عایقی کابل

به منظور تست و ارزیابی وضعیت عایق یک سیستم کابل، آزمون‌ها و روش‌های مختلفی در استانداردها و گزارشات فنی معتبر گزارش شده‌اند. در زیر و بر اساس استانداردهای IEEE 400-2012 **و** ANSI/NETA ATS 2013 **مهمترین آزمون‌های متداول و پیشرفته کابل‌های قدرت فهرست شده است:**

5-2-1 تحمل ولتاژ دی الکتریک[40]

5-2-1-1 تحمل ولتاژ دی‌الکتریک با ولتاژ DC، موسوم به DC-Hipot*

5-2-1-2 تحمل ولتاژ دی‌الکتریک با ولتاژ AC در فرکانس بسیار پایین موسوم به VLF[41]*

5-2-1-3 تحمل ولتاژ دی‌الکتریک با ولتاژ AC در فرکانس 20-300 Hz، موسوم به AC-Hipot*

5-2-1-4 تحمل ولتاژ دی‌الکتریک با ولتاژ AC میرا شده موسوم به DAC[42]

5-2-2 پاسخ دی الکتریک[43]

5-2-2-1 ضریب قدرت/اتلاف (تانژانت دلتا)[44]*

5-2-2-1-1 با ولتاژ AC در فرکانس 20-300 Hz

5-2-2-1-2با ولتاژ AC در فرکانس بسیار پایین موسوم به VLF*

5-2-2-2مقاومت عایقی[45] (IR) یا جریان نشتی[46] (در ولتاژ DC)*

5-2-2-3 ولتاژ بازیافتی[47]

5-2-2-4جریان پلاریزاسیون (قطبیدگی) و دیپلاریزاسیون[48]

5-2-2-5 اسپکتروسکوپی (طیف‌نگاری) دی الکتریک[49]

---

[40] Dielectric voltage withstand

[41] Very low frequency

[42] Damped AC

[43] Dielectric response

[44] Power/dissipation factor (tan delta)

[45] Insulation resistance

[46] Leakage current

[47] Recovery voltage

[48] Polarization/Depolarization current

[49] Dielectric spectroscopy

GasPlus.ir

5-2-3 تخلیه جزئی[50] (**PD**)*

5-2-3-1 به روش Online (بهنگام) (با ولتاژ AC در فرکانس 50 Hz)

5-2-3-2 به روش Offline

5-2-3-2-1 با ولتاژ AC در فرکانس 20-300 Hz

5-2-3-2-2 با ولتاژ AC در فرکانس بسیار پایین موسوم به VLF

5-2-4 بازتاب امواج در حوزه زمان[51] (**TDR**)

5-2-5 عکس‌برداری مادون قرمز حرارتی[52] یا ترموگرافی*

برخی از آزمون‌ها و روش‌های ذکر شده در بالا در حال حاضر در مرحله توسعه و ارزیابی بوده و تا به امروز صنعتی نشده و لذا دارای قابلیت اطمینان بالا نیستند. برخی دیگر از روش‌ها نیز بسیار نوپا و نوین بوده و در نتیجه نیاز به بررسی بیشتر دارند و امید است تا در نسخه‌های آتی به این استاندارد افزوده شوند. به همین خاطر، در این استاندارد تنها تعدادی از آزمون‌های معتبر و متداول انتخاب و شرح داده شده‌اند (مواردی که با علامت "*" متمایز شده‌اند).

5-3- سطوح ولتاژی کابل‌های قدرت

مطابق استاندارد IPS-E-EL-100 (1) سطوح مختلف ولتاژ می تواند به صورت زیر تعریف گردد:

- **ولتاژ پائین(LV) : به عنوان ولتاژهای پائینتر از 1000 ولت در یک سیستم سه فاز چهار سیمه 50 هرتز تعریف می شود. سیستم 400/230 ولت به عنوان ولتاژ استاندارد ولتاژ پائین مورد قبول قرار گرفته است. اگرچه ولتاژ 110 ولت AC برای توانهای کوچک یا سیستمهای کنترل و ولتاژ 25 ولت AC برای سیستم بازرسی عمومیت دارد.**
- **ولتاژ متوسط(MV) : به عنوان ولتاژهای بالاتر از 1000 ولت تا 10000 ولت در یک سیستم سه فاز سه سیمه 50 هرتز تعریف می شود. ولتاژهای 3/3 کیلو ولت و 6 کیلو ولت بسته به شرایط فنی، اقتصادی، ولتاژهای در دسترس امکانات عمومی و تجهیزات مشابه استفاده شده در نقاط مختلف ممکن است مورد استفاده قرار گیرد.**
- **ولتاژ بالا(HV) : به عنوان ولتاژهای 10000 ولت و بالاتر در یک سیستم سه فاز سه سیمه 50 هرتز به شرح 10 ، 11 ، 20 ، 33 ، 63 ، 66 ، 132 ، 230 کیلو ولت تعریف می شود.**

مطابق استانداردهای IPS-M-EL-271(2) و IPS-M-EL-272(2) سطوح ولتاژ کابلهای قدرت به صورت زیر تعریف گردد:

- **کابلهای ولتاژ پائین(LV) : کابلهای با سطوح ولتاژ 0.6/1(1.2) [U0/U (Um)]، کابلهای ولتاژ پایین نامیده می شوند و این کابلها برای سرویسهای با ولتاژهای پائینتر از 1000 ولت استفاده می شود.**

[50] Partial discharge

[51] Time-domain reflectometry

[52] Thermal infrared imaging

GasPlus.ir

- **کابلهای ولتاژ متوسط**(MV) : **کابلهای با سطوح ولتاژ** 3.6/6(7.2) [U0/U (Um)]، **کابلهای ولتاژ متوسط نامیده می شوند.**
- **کابلهای ولتاژ بالا**(HV) : **کابلهای با سطوح ولتاژ** 6/10(12) , 12/20(24) ، [U0/U (Um)] 18/30(36) **و ولتاژهای بالاتر کابلهای ولتاژ بالا نامیده می شوند.**

در این استاندارد سطوح مختلفی از کابل‌های قدرت را که در تاسیسات نفت و گاز ایران مورد استفاده قرار می‌گیرند، به شرح جدول (2) **در نظر گرفته شده است:**

جدول (2): **سطوح ولتاژ کابل‌های قدرت به کار رفته در صنعت نفت و گاز ایران**

طبقه‌بندی سطح ولتاژ	ولتاژ موثر نامی کابل		
	فاز به فاز (U) [kV]	فاز به زمین (U_0) [kV]	بالاترین ولتاژ سیستم (U_m) [kV]
فشار ضعیف (LV)	1	0,6	1,2
فشار متوسط (MV)	3,0	1,8	3,6
	3,3	1,9	3,6
	6	3,6	7,2
	6,6	3,8	7,2
فشار قوی (HV)	10	6	12
	11	6,35	12
	20	12	24
	22	12,7	24
	30	18	36
	33	19	36

GasPlus.ir

5-4- انتخاب نوع آزمون در شرایط خاص

1) **بهره‌برداری از یک کابل نو که بدون اتصال مفصل و سرکابل برای یک دوره زمانی طولانی انبار و یا در زمین دفن شده است (به عنوان رزرو در کنار کابل‌های مهم و حیاتی): در صورتیکه کابل به صورت مناسب و محافظت شده‌ای انبار/دفن شده است پیشنهاد می‌شود آزمون‌های سه گانه نصب، پذیرش و نگهداری بر روی کابل انجام شود. در غیر اینصورت (قراردادن کابل در معرض مستقیم تابش خورشید و رطوبت، سیلد نکردن سرهای انتهایی کابل و غیره) استفاده از آزمون**

نگهداری به جای آزمون‌های نصب و پذیرش کفایت می‌کند. البته پیشنهاد می‌شود جهت ارزیابی بهتر در ابتدا و انتهای پروسه انبار/دفن کردن، با استفاده از آزمون اندازه‌گیری مقاومت عایقی وضعیت کابل بررسی و ثبت شود.

2) تعویض بخشی از کابل کارکرده با کابل نو: قبل از اتصال کابل نو به کابل کارکرده می‌بایست آزمون نصب بر روی کابل نو انجام شود. پس از نصب مفصل و اتصال کابل نو به کابل کارکرده، بر روی سیستم جدید می‌بایست آزمون نگهداری انجام شود (به عبارت دیگر انجام آزمون پذیرش برای ترکیب کابل نو و کابل کهنه مجاز نیست).

3) تعمیر کابلی که دچار عیب شده با نصب سرکابل/مفصل جدید: در این حالت پیشنهاد می‌شود جهت حصول اطمینان از صحت اجرای عملیات نصب سرکابل/مفصل، آزمون نگهداری متناسب با نوع کابل انجام و نتایج ثبت شود.

4) تست کردن بر روی قرقره[53]: در صورتیکه به منظور ارزیابی سالم ماندن کابل در شرایط حمل و یا انبار نیاز باشد که کابل بر روی قرقره تست شود، برای کابل‌های شیلددار انجام آزمون اندازه‌گیری مقاومت عایقی و یا تست Hipot با استفاده از VLF و در سطح ولتاژ آزمون نگهداری پیشنهاد می‌شود. توجه شود که در مورد کابل‌های بدون شیلد بدلیل فراهم نبودن یک سیستم زمین مناسب در اطراف کابل ممکن است انجام تست بر روی کابل منجر به نتایج درستی نشود.

5-5- دوره‌های زمانی انجام آزمون نگهداری

بر اساس استاندارد ANSI/NETA MTS-2011 پیوست B که در مورد زمانبندی تکرار آزمون‌های برنامه تعمیر و نگهداری تجهیزات برقی بحث می‌کند، دوره‌های زمانی مناسب برای انجام این برنامه‌ها بر اساس دو شاخص تعیین می‌شوند:

1) میزان اهمیت تجهیز با توجه به باری که تغذیه می‌کند (کم، متوسط و زیاد).

2) وضعیت تجهیز از نظر میزان سلامت، کیفیت و نو بودن (ضعیف، متوسط و خوب)

بر این اساس هر چه اهمیت تجهیز بیشتر باشد و/یا از نظر کیفیت در وضعیت بدتری باشد، نیاز است تا آن تجهیز در بازه‌های زمانی کوتاهتری مورد آزمون و ارزیابی قرارگیرد و برعکس. طبق استاندارد اشاره شده در بالا برای کابل‌های قدرت بازه زمانی از 9 ماه تا 90 ماه (7,5 سال) با توجه به شاخص‌های بالا متغیر است.

با جمع بندی مطالب فوق در این استاندارد پیشنهاد می‌شود که آزمون‌های ارزیابی عایقی بر روی کابل‌های قدرت با درجه اهمیت زیاد هر 2 سال حداقل یک بار انجام شود. برای کابل‌های با درجه اهمیت متوسط این زمان می‌تواند تا حداکثر هر 4 سال یکبار افزایش یابد. برای کابل‌های با درجه اهمیت کم، بسته به تشخیص کارشناس مربوطه این زمان قابل افزایش خواهد بود.

تذکر- در صورتیکه با انجام آزمون‌های تشخیصی بر روی کابل و مقایسه آن با نتایج ثبت شده قبلی مشخص شود که وضعیت کیفیت عایقی کابل رو به تنزل گذاشته است، پیشنهاد می‌شود تا بنا به تشخیص کارشناس مربوطه آزمون‌های ارزیابی عایقی کابل در دوره‌های زمانی کوتاهتری انجام شود.

تذکر- در کابل‌های با درجه اهمیت زیاد چنانچه بنا به هر دلیلی امکان انجام آزمون‌های نگهداری هر 2 سال حداقل یک بار قابل انجام نباشد، این استاندارد پیشنهاد می‌کند تا از روش‌های پایش آنلاین نظیر تخلیه جزئی (PD) برای این گونه از کابل‌ها استفاده شود.

[53] On-reel testing

GasPlus.ir

5-6- سیستم عایق یک کابل

سیستم عایق یک کابل از بخش‌های مختلف زیر تشکیل شده است:

1) عایق بین هر هادی فاز و شیلد یا آرمور کابل
2) عایق بین هر هادی فاز با هادی فازهای دیگر
3) عایق بین شیلد فلزی و یا آرمور کابل با زمین و محیط پیرامونی (پوشش خارجی کابل)
4) لایه‌های عایقی مختلف در سرکابل‌ها و مفصل‌های متصل به یک کابل
5) فاصله خزشی سطوح سرکابل‌ها (آلودگی و رطوبت)

انواع عایق‌های کابل که در این استاندارد در نظر گرفته شده‌اند، در زیر آمده است:

1) عایق‌های پلیمری: PVC[54]، PE، XLPE و TRXLPE
2) عایق‌های لاستیکی: EPR
3) عایق‌های معدنی: MICC[55]

5-7- مراحل انجام آزمون‌های کابل

1) کابل در هر دو سر از تجهیزات متصل به آن جدا و به شکل ایمن ایزوله شود.
2) در صورتیکه امکان جداسازی کابل از تجهیز متصل به آن (ترانسفورماتور، موتور، کلید قدرت و غیره) وجود نداشته باشد، باید بررسی شود که آیا تجهیز مذکور توانایی تحمل ولتاژ با دوره زمانی مشخص آزمون را دارد یا خیر. همچنین همانطور که در بخش 4-1 توضیح داده شد، هنگامی که کابل تحت تست با استفاده از یک کلید قدرت از مابقی سیستم ایزوله شده است، می‌بایست تحمل الکتریکی آن کلید قدرت در مقابل اعمال ولتاژ آزمون (DC و یا AC) به کابل از یک طرف و ولتاژ بهره‌برداری به طرف دیگر کلید، بررسی شود.
3) کابل قبل از شروع آزمون و اعمال ولتاژ تست به نحو مناسب دشارژ شود (مطابق با بخش 5-8).
4) سرکابل‌ها از هر نوع آلودگی و رطوبت تمیز شوند.
5) در زمان انجام آزمون پارامترهای مورد نیاز ثبت شوند (مطابق با بخش 5-9).
6) پیشنهاد می‌شود پیش از انجام هر تستی، آزمون اندازه‌گیری مقاومت عایقی بر روی کابل انجام گیرد. این آزمون بر تمامی آزمون‌های دیگر مقدم است.

[54] Polyvinyl chloride

[55] Mineral insulated copper clad

GasPlus.ir

7) در شروع هر آزمونی و در هنگام اتصال دستگاه انجام تست، ابتدا ترمینال‌ها و بخش‌های مرتبط با اتصال به سیستم زمین را اجرا کرده و سپس اتصالات دیگر برقرار شود.

8) در پایان هر تست و با خاموش کردن دستگاه تست (در صورت فراهم بودن این قابلیت) اجازه داده شود دستگاه سیستم کابل را دشارژ کند (مطابق با بخش 5-8).

9) در پایان مراحل انجام آزمون و به منظور جداسازی کابل و دستگاه تست از یکدیگر، الزاماً می‌بایست اتصالات مربوط به سیستم زمین، آخرین مداری باشد که قطع می‌شود.

5-8- دشارژ سیستم کابل

در پایان فرآیند انجام هر آزمون بر روی کابل، تمامی هادی‌های فلزی آن می‌بایست تا زمانی که همه انرژی شارژ شده در آن (به صورت خازنی و یا جذبی) تخلیه نشده است، به یک سیستم زمین به صورت ایمن و پایدار اتصال یابند. زمان دشارژ در کابل‌های مختلف با توجه به طول و سطح ولتاژ آن متفاوت است اما به طور تجربی این زمان معمولا بین 10 ثانیه تا 1 دقیقه است (در این مدت تمام هادی‌های کابل می‌بایست به صورت مستقیم زمین شده باشند). باید در نظر داشت در صورتیکه پیش از آزمون کابل کاملا دشارژ نشده باشد، بعلت وجود شارژ یا قطبیدگی باقیمانده[56] در عایق کابل، نتایج آزمون با خطا همراه خواهد بود.

توجه شود که دشارژ کابل به کمک دستگاه سنجش مقاومت عایقی (در صورتیکه این قابلیت را داشته باشد) تنها منجر به تخلیه انرژی ذخیره شده در پارامتر خازنی کابل می‌شود و در نتیجه برای تخلیه انرژی جذبی، کابل برای مدت بیشتری می‌بایست به زمین به صورت مستقیم متصل شود.

در حالت کلی، به منظور رعایت اصول ایمنی، این استاندارد پیشنهاد می‌کند تا هم در طول فرآیند انجام آزمون و هم در پایان آن تا زمانی که هادی‌های کابل به ترمینال‌های مربوطه خود در تابلو و یا تجهیز متصل نشده‌اند همه هادی‌های فلزی که در آزمون مورد نظر به آن‌ها ولتاژ اعمال نمی‌شود، زمین گردند.

در صورتیکه مد نظر است تا کابلی که دارای ولتاژ است بدون استفاده از دستگاه دشارژ شود، زمین کردن هادی‌های برقدار توسط یک عنصر مقاومتی که توانایی تحمل عایقی ولتاژ کابل و جذب انرژی ذخیره شده در آن را داشته باشد، صورت گیرد. این کار بعلت محدود کردن جریان دشارژ خازنی و جلوگیری از آسیب دیدگی احتمالی سیستم عایقی کابل تحت دشارژ است. علاوه بر این پیشنهاد می‌شود تا در هنگام دشارژ کابل ولتاژ آن نیز پایش شود. توجه شود که اتصال کابل به طور مستقیم به زمین تنها زمانی مجاز است که ولتاژ کابل به زیر 10 درصد مقدار نامی خود رسیده باشد.

تذکر: یکی از خطرات بالقوه عدم دشارژ مناسب کابل قدرت تحت آزمون، باقی ماندن شارژ خازنی در کابل است که لذا در هنگام در سرویس قرار دادن و در نتیجه برقدار کردن مجدد کابل، ممکن است باعث بروز خطای آنی در نقاط متعدد کابل شود.

[56] Residual charges or unrelaxed polarization

GasPlus.ir

5-9- ثبت اطلاعات آزمون

در هر آزمون برای تحلیل‌های آینده اطلاعات زیر می‌بایست جمع‌آوری شود:

1) نام، مکان و طول سیستم کامل
2) نوع، مقادیر نامی و تاریخ نصب کابل و اتصالات آن (سرکابل‌ها و مفصل‌ها)
3) ولتاژ بهره‌برداری سیستم کابل
4) ثبت اطلاعات محیطی نظیر (الف) دمای عایق کابل در بخش‌های مختلف، (ب) دمای محیط‌های مختلفی که کابل در آن‌ها قرار گرفته است، (ج) رطوبت هوای مجاور کابل و (د) فشار هوا
5) نوع روش، سطح ولتاژ (پیک و RMS) و مدت زمان انجام آزمون و دیگر پارامترهای مرتبط با آزمون مانند فرکانس و شکل موج ولتاژ آزمون و غیره
6) تجهیزات آزمون (نوع و شماره سریال)
7) نتایج حاصله از آزمون: قبول یا رد شدن و هر نوع اندازه‌گیری انجام شده که با توجه به نوع آزمون بدست آمده است.
8) سطح ولتاژی که کابل در آزمون رد شده است: سطح ولتاژ لحظه‌ای درست و دقیق در زمانی که خطای کابل اتفاق افتاده است (توجه کنید که ولتاژ پیک و RMS مد نظر نیست)
9) مدت زمانی که کابل تحت ولتاژ آزمون قرار داشته تا خطای کابل اتفاق افتاده است.
10) اجزایی از سیستم کابل که در هنگام آزمون دچار عیب شده‌اند، به همراه شناسایی[57] و مکان آن
11) تاریخ، مکان، نام و مشخصات شخصی که آزمون را اجرا کرده است.

5-10- بررسی تاثیر شرایط محیطی بر روی نتایج حاصل از آزمون

1) با توجه به تاثیر شدید دما بر روی نتایج آزمون‌های کابل، پیشنهاد می‌شود تا پس از بی برق کردن کابل مدت زمان کافی صبر شود تا دمای کابل با محیط اطراف خود به یک تعادل دمایی برسد. این کار سبب می‌شود تا در طول انجام آزمون دمای عایق کابل تغییر نکرده و تقریبا ثابت بماند.

2) برخی از عیوب کابل وابسته به دما بوده و علائم بروز آن‌ها تنها در دمای بالا (مثل زمانی که کابل در اثر جریان‌دهی گرم می‌شود) قابل مشاهده است. لذا یکی از آزمون‌های محتمل بر روی کابل انجام آن درست بلافاصله پس از بی برق کردن کابل است. در این شرایط و در طول فرآیند آزمون دمای عایق کابل با یک شیب معمولا زیاد شروع به کاهش تا سطح دمای محیط اطراف خود می‌کند. در نتیجه به هنگام ثبت رخدادهای آزمون، دمای عایق کابل نیز باید به دقت اندازه‌گیری و ثبت شود. ذکر این نکته ضروری است که قدرت عایقی کابل در دماهای بالاتر کاهش یافته و لذا در این شرایط در اعمال ولتاژهای بالا به کابل باید دقت مضاعف شود.

3) در صورتیکه دمای محیطی که کابل بخصوص سرکابل‌ها در آن قرار دارد بیش از مقدار دمای نقطه شبنم آن محیط باشد، انجام آزمون‌های عایقی مجاز است. در غیر اینصورت وجود شبنم بر روی سرکابل‌ها ممکن است چنان نتایج آزمون را تغییر دهد که نتیجه آزمون به اشتباه رای بر معیوب بودن کابل بدهد.

[57] Identification

GasPlus.ir

5-11- انجام آزمون در شرایطی که امکان جداسازی کابل از تجهیز متصل به آن نباشد

برای کسب نتایج دقیق از وضعیت عایقی یک سیستم کابل و در نتیجه ارزیابی بهتر آن در تمامی استانداردهای مرتبط پیشنهاد شده است تا در صورت امکان کابل را در هر دو سر انتهایی خود از تجهیز متصل شده به آن قطع کنید. با این حال در مواردی که بر اساس تشخیص کارشناس مربوطه امکان انجام این جداسازی از یک سر کابل بنا به هر دلیلی فراهم نیست در انتخاب نوع و شرایط انجام آزمون بویژه سطح ولتاژ اعمالی به کابل شرایط عایقی تجهیز متصل به آن را می‌بایست الزاماً و به دقت در نظر گرفت. باید توجه شود که نتایج به دست آمده از چنین آزمونی دقت کافی را نداشته لذا در تعبیر آن باید همواره جانب احتیاط را لحاظ کرد.

همچنین در این استاندارد پیشنهاد می‌شود در شرایط فوق در صورت امکان نتایج آزمون را حداقل یکبار برای دو حالت وصل بودن و قطع بودن تجهیز از کابل ثبت کرد. لذا در دفعات بعدی تا زمانیکه نتایج آزمون تغییرات زیادی نداشته باشد نیازی به جداسازی کابل از تجهیز نیست.

6- آزمون اندازه‌گیری مقاومت عایقی (IR)

آزمون IR تقریبا تنها آزمون کاربردی برای ارزیابی عایقی کابل‌های با ولتاژ نامی[58] زیر $5\ \mathrm{kV}$ می‌باشد. علاوه بر این برای کابل‌های با ولتاژ نامی بیش از $5\ \mathrm{kV}$ نیز آزمون مقدماتی جهت ارزیابی اولیه کابل، آزمون اندازه گیری IR است. در این روش به طور کلی دو گروه از لایه‌های عایقی در کابل بررسی می‌شوند:

1) مقاومت عایقی بین هر ترکیب ممکن از هادی‌های کابل
2) مقاومت عایقی بین سیستم زمین الکتریکی و شیلد فلزی یا آرمور کابل

6-1- نحوه سیم‌بندی و اتصال دستگاه اندازه‌گیری مقاومت عایقی به کابل قدرت

شکل (1) نحوه صحیح اتصال یک دستگاه اندازه‌گیر مقاومت عایقی به کابل قدرت را برای اندازه‌گیری مقاومت کابل‌های تک رشته و چند رشته نشان می‌دهد. شکل (1-الف) برای اندازه‌گیری مقاومت فاز به زمین یک کابل تک رشته، شکل (1-ب) مقاومت فاز به فاز یک کابل چند رشته و شکل (1-ج) مقاومت فاز به زمین یک کابل چند رشته را نمایش می‌دهند. در این شکل‌ها نحوه اتصال ترمینال گارد (G) دستگاه به کابل توجه کنید.

نکته: توجه شود در کابل‌هایی که هر یک از رشته‌ها شیلد فلزی جداگانه‌ای دارند، اندازه‌گیری مقاومت فاز به فاز لزومی ندارد.

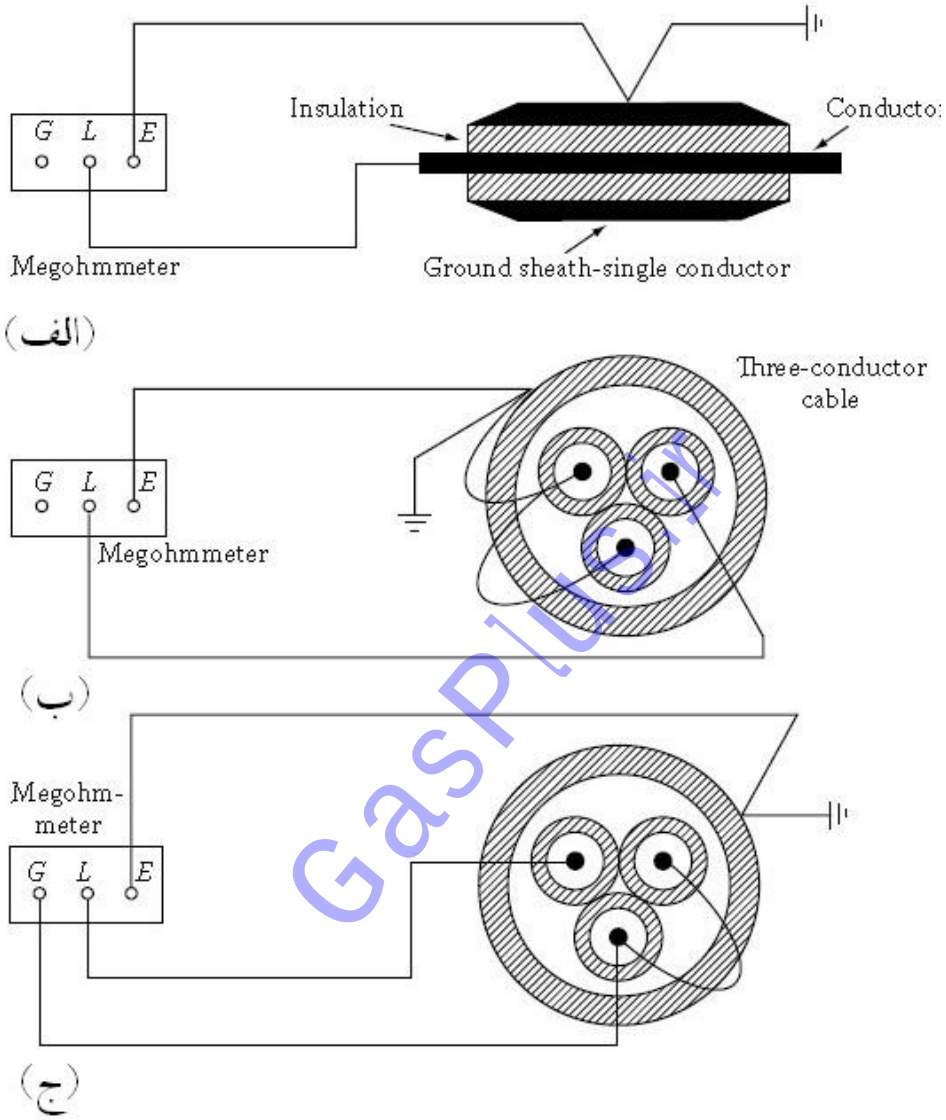
تذکر: توجه شود که تمامی هادی‌ها، شیلدهای فلزی و آرمور کابل در هنگام آزمون مقاومت عایقی می‌بایست الزاماً به یکی از ترمینال‌های زمین E، خط L و گارد G دستگاه اتصال داشته باشند. همچنین ترمینال زمین E در هنگام تست همواره می‌بایست به یک الکترود زمین ایمن اتصال پایدار داشته باشد.

58 در مواردی که در متن این استاندارد صراحتاً به نوع ولتاژ نامی (U_0, U و U_m) اشاره نشده است، منظور از ولتاژ نامی، ولتاژ موثر نامی کابل (خط به خط (U) برای کابل‌های سه فاز و فاز به زمین(U_0) برای کابل‌های تک فاز) می باشد.

GasPlus.ir

نکته: توجه شود که ترمینال گارد دستگاه تست مقاومت عایقی G دارای پتانسیلی برابر با ترمینال خط دستگاه L بوده و هر دو این ترمینال‌ها نسبت به ترمینال زمین دستگاه E دارای پتانسیل منفی هستند.

نکته: در برخی از تجهیزات اندازه‌گیر مقاومت عایقی برای نمایش ترمینال زمین E از نشانه "-" و برای نمایش ترمینال خط L از نشانه "+" استفاده می‌شود.



شکل (1): نحوه سیم‌بندی صحیح اتصال یک دستگاه اندازه‌گیری مقاومت عایقی به کابل قدرت برای اندازه‌گیری مقاومت (الف) فاز به زمین یک کابل تک رشته، (ب) فاز به فاز یک کابل چند رشته و (ج) فاز به زمین یک کابل چند رشته

GasPlus.ir

6-2- آزمون پذیرش مقاومت عایقی کابل

بر اساس استاندارد IEEE Std 525-2007 پیوست M کمترین مقدر قابل قبول برای مقاومت عایقی یک کابل در مرحله پذیرش یعنی زمانیکه یک کابل نو برای اولین بار مفصل و سرکابل خورده است، با اعمال ولتاژ حداقل 500 V، از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$IR_{\min}^{[M\Omega]} = \left(U^{[kV]} + 1\right) \times \frac{304.8}{L^{[m]}} \quad (1)$$

که در آن IR_{min} کمترین مقدار قابل قبول برای مقاومت عایقی کابل بر حسب مگا اهم، U ولتاژ موثر نامی کابل (خط به خط برای کابل‌های سه فاز و فاز به زمین برای کابل‌های تک فاز) بر حسب کیلو ولت و L طول کابل بر حسب متر است.

توجه شود که برای رابطه فوق در استاندارد IEEE Std 525-2007 اشاره‌ای به دمای مرجع آزمون نشده است. جدول (3) حداقل مقدار IR را در ولتاژهای نامی مختلف کابل بر اساس رابطه (1) و برای طول یک کیلومتر ارائه داده است.

جدول (3): ولتاژ و حداقل مقدار IR در آزمون پذیرش مقاومت عایقی برای کابل‌های قدرت تا 33 kV

ولتاژ نامی کابل		مقدار کمینه IR در آزمون پذیرش	ولتاژ اعمالی در آزمون پذیرش IR
فاز به فاز	فاز به زمین	طبق رابطه (1)	فاز به زمین و فاز به فاز
U [kV]	U_0 [kV]	[MΩ.km]	ولتاژ پیشنهادی [V]
1 >	0,6 >	0,49	500
1	0,6	0,61	1000
3	1,8	1,22	2500
3,3	1,9	1,31	2500
6	3,6	2,13	5000
6,6	3,8	2,32	5000
10	6	3,35	5000
11	6,35	3,66	5000
20	12	6,40	10000
22	12,7	7,01	10000
30	18	9,45	10000
33	19	10,36	10000

GasPlus.ir

6-3- پارامترهای تاثیر گذار بر روی مقدار اندازه‌گیری شده مقاومت عایقی کابل

پارامترهای تاثیر گذار بر روی مقاومت عایقی اندازه گیری شده یک کابل به قرار زیر است:

1) طول کابل: با افزایش طول کابل، پارامتر مقاومت عایقی به طور خطی کاهش می‌یابد.

2) دمای عایق هادی کابل: دمای عایق هادی کابل تاثیر قابل توجهی بر روی پارامتر مقاومت عایقی می‌گذارد. توجه شود که بخش‌های مختلف از یک سیستم کابل می‌تواند در شرایط دمایی متفاوت قرار گیرد (توضیحات بیشتر در بخش 6-4 آمده است).

3) رطوبت: در صورتیکه دمای کابل از دمای نقطه شبنم[59] محیط کمتر باشد، رطوبت می‌تواند از طریق سرکابل‌ها باعث کاهش مقدار پارامتر مقاومت عایقی کابل شود.

4) اندازه ولتاژ آزمون: برای یک کابل نرمال تغییر ولتاژ اعمالی به آن نباید در مقدار پارامتر مقاومت عایقی تاثیر چندانی داشته باشد. با این حال برخی از ایرادات موجود در کابل تنها در ولتاژهای بالا فعال شده و می‌توانند مقدار پارامتر مقاومت عایقی کابل را تغییر دهند.

5) مدت زمان آزمون: با افزایش زمان آزمون مقدار پارامتر مقاومت عایقی در یک کابل سالم افزایش می‌یابد. میزان تغییرات بسته به طول کابل پس از گذشت 1 تا 10 دقیقه از شروع اعمال ولتاژ، بسیار ناچیز خواهد بود.

6) عمر کابل: با افزایش عمر کابل، سیستم عایقی آن به طور طبیعی و یا ناشی از استرس‌های حرارتی، الکتریکی و مکانیکی دچار فرآیند پیرشدگی[60] شده، لذا مقدار مقاومت عایقی کابل به مرور زمان کاهش می‌یابد. توجه کنید که حتی اگر کابل در انبار نگهداری شده باشد و/یا هرگز در سرویس قرار نگرفته باشد، سیستم عایقی آن باز هم دچار یک پیرشدگی تدریجی خفیف خواهد شد.

7) جنس عایق کابل: عایق‌های از جنس مختلف دارای مقاومت عایقی مختلف هستند. در نتیجه دو کابل با یک ولتاژ نامی که از عایق‌های مختلف استفاده می‌کنند، دارای مقاومت عایقی متفاوت هستند.

8) ضخامت عایق: هرچه ضخامت عایق یک کابل بیشتر باشد، مقاومت عایقی آن افزیش می‌یابد. توجه شود که کابل‌ها برای یک سطح ولتاژ ممکن است با ضخامت عایقی مختلف ساخته شوند.

9) اندازه سطح مقطع هادی‌های کابل: هرچه سطح مقطع هادی‌های یک کابل بزرگتر باشد میزان مقاومت عایقی آن کمتر خواهد شد.

[59] Dew point

[60] Aging

GasPlus.ir

10) تعداد، نوع و وضعیت سطوح مفصل‌ها و سرکابل‌ها: کیفیت جنس و نحوه اجرای سرکابل و مفصل و میزان آلودگی و رطوبت موجود بر روی سرکابل‌ها می‌تواند بر روی مقدار مقاومت عایقی کابل اثر گذار باشد.

6-4- ضریب اصلاح دمایی در آزمون مقاومت عایقی کابل

ضریب اصلاح دمایی به طور مستقیم به نوع و جنس عایق کابل بستگی دارد، لذا نمی‌توان یک ضریب مشخص برای همه انواع کابل ارائه نمود. با این حال برخی از مراجع و استانداردها جدول تصحیح دمایی را برای مواد عایقی مختلف ذکر کرده‌اند که با دقت خوبی از رابطه زیر تبعیت می‌کنند:

$$K_T = (0.50)^{(40-T)/F} \quad (2)$$

که در این رابطه K_T ضریب اصلاح دمایی، T دمای واقعی عایق کابل و F ضریبی متناسب با جنس ماده عایق کابل است. مقادیر داده شده در جدول (4) بر اساس رابطه فوق و به ازای F های مختلف، ضریب اصلاح دمایی را محاسبه و ارائه نموده است.

از آنجا که در برخی از متون اشاره شده که به طور تقریبی با هر 10 درجه افزایش دمای کابل، پارامتر مقاومت عایقی نصف می‌شود و بالعکس، در جدول (4) ستون وسط با در نظر گرفتن مقدار 10 برای ضریب F، ضریب اصلاح دمایی را برای این حالت محاسبه کرده است.

لازم به ذکر است که ضریب F برای هر کابلی نسبت به کابل دیگر ممکن است متفاوت باشد. لذا بهترین روش برای تعیین این پارامتر اندازه‌گیری مقاومت عایقی یک کابل در دو دمای متفاوت و تعیین مقدار دقیق F برای آن کابل با استفاده از رابطه زیر است:

$$F = (T_1 - T_2) \times \frac{Ln(0.5)}{Ln(IR_{T1}/IR_{T2})} \quad (3)$$

در رابطه فوق IR_{T1} و IR_{T2} مقاومت عایقی اندازه‌گیری شده یک کابل در دو دمای به ترتیب T_1 و T_2 می‌باشد.

در عمل به علت قرارگیری بخش‌های یک سیستم کابل در شرایط محیطی مختلف، استفاده از روش فوق برای تعیین ضریب F بسیار سخت است.

GasPlus.ir

جدول (4): ضریب اصلاح دمایی برای مقاومت عایقی کابل‌ها با دمای مرجع 40°C

دمای عایق کابل (T)	ضریب اصلاح دمایی K_T مطابق رابطه (2)		
	تجهیزات با عایق خشک[61]	عمومی[62]	کابل با عایق PVC[63]
[°C]	F=15	F=10	F=4.670173
-10	0,10	0,031	-
-5	0,13	0,044	-
0	0,16	0,062	-
5	0,20	0,088	0,006
10	0,25	0,125	0,012
15	0,31	0,177	0,024
20	0,40	0,250	0,051
25	0,50	0,354	0,108
30	0,63	0,500	0,227
35	0,79	0,707	0,476
40	1,00	1,000	1,000
45	1,26	1,414	2,100
50	1,59	2,000	4,411
55	2,00	2,828	9,266
60	2,52	4,000	19,46
65	3,17	5,657	40,87
70	4,00	8,000	85,85
75	5,04	11,314	180,31
80	6,35	16,000	-
85	8,00	22,627	-
90	10,08	32,000	-
95	12,70	45,255	-
100	16,00	64,000	-

GasPlus.ir

[61] مقادیر این ستون بر اساس جدول 100.14.1 از استاندارد ANSI/NETA MTS-2011 می‌باشد.

[62] مقادیر این ستون به گونه‌ای محاسبه شده‌اند که با هر 10 درجه افزایش دمای عایق کابل، ضریب اصلاح دمایی دو برابر شود.

[63] مقادیر این ستون به استناد مرجع [1] پیوست A در صفحه 10 و با تصحیح برای دمای مرجع 40°C داده شده است.

بعد از اندازه گیری مقاومت عایقی کابل در دمای واقعی T (یا IR_T) و برآورد ضریب اصلاح دمایی K_T به کمک رابطه (2) و یا جدول (4) مقدار مقاومت عایقی کابل در دمای مرجع $40°C$ (یا IR_{40}) به کمک رابطه زیر قابل محاسبه خواهد بود:

$$IR_{40} = K_T \times IR_T \quad (4)$$

در صورتیکه بخش‌های مختلف یک کابل در شرایط مختلف نصب قرار داشته باشند به گونه‌ای که هر بخش دارای شرایط آب و هوایی متفاوت نسبت به سایر بخش‌ها باشد، آنگاه می‌بایست ضریب اصلاح دمایی معادل کابل با استفاده از رابطه زیر محاسبه شود:

$$K_{Teq} = \frac{\sum_{j=1}^{n} L_j K_{Tj}}{L} \quad (5)$$

که در آن K_{Teq} ضریب اصلاح دمایی معادل کابل، L_j و K_{Tj} به ترتیب طول و ضریب اصلاح دمایی هر بخش کابل (n بخش) و L طول کل کابل است.

6-5- آزمون نگهداری مقاومت عایقی کابل

با توجه به پارامترهای تاثیر گذار بر روی مقدار مقاومت عایقی که در بخش 6-3 مورد بررسی قرار گرفته‌اند، بی تردید بررسی وضعیت سلامت عایق کابل تنها بر اساس یک بار اندازه‌گیری ناممکن است. بر این اساس با استفاده از تکنیک‌های زیر می‌توان تا حدودی معیارهای ارزیابی را در این آزمون گسترش داد [2-3]:

1) مقایسه مقدار مقاومت عایقی فازهای مختلف در یک کابل با هم: برای یک کابل سالم انتظار می‌رود تا اختلاف در این پارامتر زیاد نباشد.

2) مقایسه مقاومت عایقی یک کابل با کابل یا کابل‌های مشابه دیگر: البته این کار می‌بایست بعد از اعمال ضرایب اصلاح مانند دما و طول صورت گیرد.

3) مقایسه مقاومت عایقی یک کابل با مقادیر اندازه‌گیری شده در زمان‌های گذشته برای همان کابل: با رسم پروفیل مقاومت عایقی یک کابل بر حسب زمان، انتظار این است که مقدار این پارامتر با گذشت زمان با یک شیب ملایم دچار تنزل شود. در صورتیکه شیب منحنی تغییر زیادی کند، این می‌تواند نشانه‌ای از وجود یک مشکل در آن کابل باشد.

4) مقایسه و اندازه‌گیری مقاومت عایقی برای یک کابل با اعمال ولتاژهای مختلف: پیشنهاد می‌شود تا اندازه‌گیری مقاومت عایقی یک کابل حداقل در دو ولتاژ مختلف انجام شده و با هم مقایسه شوند. در حالت کلی مقدار مقاومت عایقی یک کابل نمی‌بایست به ولتاژ بستگی داشته باشد و در نتیجه تغییر زیادی کند.

5) اندازه‌گیری و محاسبه شاخص پلاریزاسیون (PI): می‌توان مشابه با موارد بیان شده در بندهای 1 تا 4 در بالا، این بار مقایسه‌هایی بر پایه شاخص PI داشت. در حالت کلی انتظار این است که مقاومت عایقی کابل با گذشت زمان پیوسته

GasPlus.ir

افزایش یابد. لذا در صورتیکه شاخص پلاریزاسیون (با هر تعریفی) کمتر از یک باشد، می‌تواند نشانه‌ای از وجود یک مشکل در کابل باشد (برای مطالعه بیشتر به بخش 6-7 مراجعه شود).

نکته: از آنجا که تنها برخی از عیوب بر روی پارامتر مقاومت عایقی کابل تاثیر می‌گذارند، لذا اندازه‌گیری این پارامتر به تنهایی برای شناسایی تمامی عیوب کابل کافی نیست. لذا پیشنهاد می‌شود تا در صورت مشاهده هرگونه علائم مشکوک و یا برای کابل‌های با حساسیت و ریسک بالا، از آزمون‌های تکمیلی دیگر که در بخش‌های دیگر این استاندارد بررسی شده‌اند استفاده شود.

6-6- ولتاژ اعمالی به کابل در آزمون نگهداری IR

بر اساس استاندارد IEEE Std 525-2007 پیوست N برای اندازه‌گیری مقاومت عایقی یک کابل کارکرده باید به میزان حداقل 50 درصد ولتاژ نامی کابل(U_0) ، ولتاژ اعمال کرد. در نتیجه با فرض ولتاژ نامی کابل برابر U_0 این قانون در این استاندارد برای کابل‌های با ولتاژ نامی کمتر از 5 kV رعایت شده است (جدول (5) ملاحظه شود).

با این حال به دو دلیل ولتاژ اعمالی به کابل‌های با ولتاژ نامی بیش از 5 kV از این قانون پیروی نمی‌کنند. اول اینکه ولتاژ DC اساسا برای کابل خطرناک است و دوم اینکه برای این گروه از کابل‌ها روش آزمون VLF به عنوان آزمون تکمیلی پیشنهاد می‌شود (جدول (5) ملاحظه شود).

همانطور که در بخش 6-5 این استاندارد توضیح داده شده است، یکی از معیارهای ارزیابی کابل مقایسه مقدار مقاومت عایقی کابل در دو سطح ولتاژ مختلف است. بر این اساس در جدول (5) دو سطح ولتاژ حداقل و حداکثر برای هر کابل پیشنهاد شده است.

جدول (5): حداقل و حداکثر ولتاژ در آزمون نگهداری مقاومت عایقی برای کابل‌های قدرت کارکرده

ولتاژ نامی کابل		ولتاژ اعمالی در آزمون نگهداری IR	
فاز به فاز	فاز به زمین	فاز به زمین و فاز به فاز	
U [kV]	U_0 [kV]	پله اول: حداقل	پله دوم: حداکثر
1 >	0,6 >	250	500
1	0,6	500	1000
3,0	1,8	1000	2500
3,3	1,9	1000	2500
6	3,6	1000	2500
6,6	3,8	1000	2500
10	6	2500	5000
11	6,35	2500	5000
20	12	2500	5000
22	12,7	2500	5000
30	18	2500	5000
33	19	2500	5000

GasPlus.ir

6-7- شاخص پلاریزاسیون (یا قطبیدگی) PI

همانطور که در بخش 3-1 شاخص پلاریزاسیون تعریف شده است، PI معیاری است برای ارزیابی کیفیت یک عایق. در یک کابل سالم مقدار مقاومت عایقی آن با شروع آزمون و اعمال ولتاژ به کابل با گذشت زمان همواره مقداری افزایشی یا ثابت خواهد داشت (با فرض اینکه دمای عایق کابل طی فرآیند آزمون ثابت باشد). در صورتیکه IR کابل طی بازه زمانی آزمون کاهش یابد یا به شکل ناپایداری تغییر کند، عایق کابل در وضعیت سوال بر انگیزی به سر می‌برد. تعریف شاخص پلاریزاسیون می‌گوید:

$$PI = \frac{IR_{t2}}{IR_{t1}}, t_2 \rangle t_1 \qquad (6)$$

در رابطه فوق PI شاخص پلاریزاسیون کابل، IR_{t1} و IR_{t2} مقدار مقاومت عایقی کابل در دمای یکسان بعد از سپری شدن به ترتیب زمان t_1 و t_2 از لحظه شروع آزمون و اعمال ولتاژ به کابل هستند.

توجه شود که در تعریف شاخص پلاریزاسیون پارامتر دما بی تاثیر بوده و نیازی به استفاده از ضریب اصلاح دمایی نمی‌باشد، مگر اینکه در طول فرآیند آزمون دمای عایق کابل تغییر کند.

انتخاب زمان‌های t_1 و t_2 بستگی مستقیم با طول کابل و زمان مورد نیاز برای شارژ یک کابل دارد. زمان t_2 بهتر است به گونه‌ای انتخاب شود که پارامتر IR کابل به مقدار پایدار خود رسیده باشد. لذا کارشناس مربوطه می‌تواند با توجه به زمان شارژ کابل و به تشخیص خود یکی از زمان‌های زیر را انتخاب کند:

1) t_2 = 1 دقیقه و t_1 = 30 ثانیه یعنی $P.I._{30/1}$

2) t_2 = 3، 5 یا 10 دقیقه و t_1 = 1 دقیقه یعنی $P.I._{3/1}$ یا $P.I._{5/1}$ یا $P.I._{10/1}$

به منظور افزایش دقت حول نقطه 1 دقیقه و همچنین با هدف ترسیم داده‌ها بر روی یک منحنی با مختصات لگاریتمی، می‌توان مقادیر IR را در زمان‌های 15 ثانیه، 30 ثانیه، 45 ثانیه، 1 دقیقه، 1,5 دقیقه، 2 دقیقه، 3 دقیقه، 4 دقیقه، ...، الی 10 دقیقه ثبت کرد. توجه داشته باشید که مقدار PI با هر تعریفی می‌بایست همواره بزرگتر از 1 باشد. علاوه بر این میزان تغییرات آن نیز نسبت به مقادیر ثبت شده قبلی نباید زیاد باشد. در غیر اینصورت کابل وضعیتی سوال بر انگیز خواهد داشت.

6-8- آزمون IR بر روی عایق پوشش یا غلاف بیرونی کابل

قبل از انجام این آزمون هرگونه اتصال کابل با زمین (از طریق آرمور و یا شیلد فلزی) را در هر دو طرف کابل قطع و به شکل ایمن از زمین ایزوله می‌کنیم. سپس ولتاژ آزمون را (حداقل 250 ولت و حداکثر 1 kV) بین آرمور و/یا شیلد از یک طرف و سیستم زمین الکتریکی از طرف دیگر اعمال کرده و پس از گذشت یک دقیقه مقدار مقاومت عایقی را ثبت می‌کنیم. وجود هرگونه اتصال کوتاه ناخواسته بین شیلد و/یا آرمور کابل با زمین نشان دهنده وجود یک عیب بوده و می‌بایست برطرف شود.

تذکر: در کابل‌هایی که آرمور و یا شیلد فلزی ندارند، انجام این آزمون لزومی ندارد.

GasPlus.ir

6-9- بررسی محدودیت‌ها در آزمون اندازه‌گیری مقاومت عایقی

دستگاه اندازه‌گیری مقاومت عایقی حداقل در دو مورد زیر با محدودیت مواجه است (برای کسب اطلاعات بیشتر به برگه مشخصات دستگاه اندازه‌گیری مراجعه شود):

1) **کابل با طول زیاد: یک دستگاه اندازه‌گیر IR باید قابلیت شارژ جریان خازنی کابل را داشته باشد. در غیر اینصورت مقداری که دستگاه قرائت می‌کند صحیح نخواهد بود. باید توجه داشت که هر چقدر طول یک کابل طولانی‌تر باشد مقدار پارامتر خازنی آن افزایش خواهد یافت.**

2) **مقاومت عایقی بسیار بزرگ: یک دستگاه اندازه‌گیر IR دارای محدودیت در بیشترین مقدار قابل اندازه‌گیری IR دارد. لذا در صورتی که در یک کابل پارامتر IR آن بیشتر از محدودیت اشاره شده باشد، دستگاه قادر به اندازه‌گری صحیح این پارامتر نخواهد بود.**

تذکر[64]: در صورتیکه مقدار مقاومت عایقی کابل در 1 دقیقه یعنی IR_1 (در $40^{\circ C}$) بزرگتر از $5000\ M\Omega$ باشد، به این علت که جریان نشتی کسری از میکرو آمپر خواهد بود و در نتیجه هر نوع آلودگی و رطوبت جزئی می‌تواند در مقدار قرائت شده تاثیر گذار باشد، در عمل ممکن است مقادیر قرائت شده دقت کافی نداشته باشند.

6-10- پروفیل مقاومت عایقی (IRP)

با استفاده از اطلاعاتی که در آزمون اندازه‌گیری مقاومت عایقی و شاخص پلاریزاسیون بدست می‌آید، می‌توان مقادیر مختلف IR را بر حسب زمان به صورت گسسته (مثلا هر 5 ثانیه) در بازه زمانی 10 دقیقه رسم کرد، که از این گراف با نام پروفیل مقاومت عایقی (IRP) در مراجع و استانداردها[65] یاد می‌شود. علاوه بر مقادیری که از آزمون‌های مقاومت عایقی و شاخص پلاریزاسیون بدست می‌آید، روش ترسیم پروفیل مقاومت عایقی کابل می‌تواند اطلاعات مفیدی را، بویژه در حالتی که مقاومت عایقی مقداری بیش از 5000 مگا اهم دارد، به دست بدهد.

GasPlus.ir

[٦٤] این تذکر بر اساس استاندارد IEEE Std 43-2013 بخش 11.2 و 12.2.2 داده شده است.

[٦٥] رجوع شود به استاندارد IEEE Std 43-2013 بخش Annex D.

7- آزمون ولتاژ بالای AC موسوم به AC-Hipot

بر اساس استاندارد IEEE Std 400-2012 آزمون ولتاژ AC برای کابل به صورت‌های زیر قابل انجام است:

1) ولتاژ AC سینوسی در فرکانس 50 Hz و به صورت Online (یعنی همان ولتاژ تغذیه کابل)
2) ولتاژ AC سینوسی در فرکانس 20-300 Hz و به صورت Offline

تا زمان تهیه این متن، استاندارد IEEE Std 400 و زیر مجموعه‌هایش در مورد نحوه انجام آزمون‌های اشاره شده در بالا دستورالعملی را پیشنهاد نداده است.

7-1- آزمون پذیرش

بر اساس استاندارد IEC 60502.2-2005 بخش 20، آزمون ولتاژ AC برای کابل با مشخات زیر مجاز است:

1) این آزمون یک آزمون پذیرش است، یعنی برای یک کابل نو، بعد از اتصال سرکابل‌ها و مفصل‌ها و قبل از شروع بهره‌برداری از سیستم کابل
2) این آزمون تنها برای کابل‌های با ولتاژ نامی 6 kV تا 30 kV مجاز است.
3) این آزمون اختیاری بوده و بر اساس یک توافق بین خریدار و فروشنده یا پیمانکار قابل انجام است.

در صورت برقرار بودن شرایط بالا انجام تست به دو صورت زیر امکان پذیر است:

1) تست به مدت 5 دقیقه باید ولتاژ فاز به فاز سیستم، بین هادی کابل و شیلد فلزی کابل اعمال شود.
2) تست به مدت 24 ساعت باید ولتاژ نرمال سیستم، به کابل انجام شود.

7-2- آزمون نگهداری برای کابل‌های شیلددار

جدول (6) ولتاژهای آزمون نگهداری برای کابل‌های شیلددار با ولتاژهای بهره‌برداری مختلف را ارائه می‌کند. مدت زمان اعمال ولتاژ به کابل در آزمون نگهداری حداقل یک دقیقه و حداکثر 5 دقیقه پیشنهاد می‌شود.

نکته: ولتاژهای ارائه شده در ستون آزمون نگهداری جدول (6) مقادیر پیشنهادی می‌باشند. لذا در صورت تشخیص کارشناس مربوطه امکان اعمال ولتاژ بالاتر به کابل وجود دارد. با این حال پیشنهاد می‌شود تا مقدار ولتاژ اعمالی به کابل هیچگاه بیش از 85 درصد ولتاژ معادل در تست کارخانه‌ای نشود.

تذکر: در هنگام انجام آزمون نگهداری کابل، در صورتی که ولتاژ بهره‌برداری آن کمتر از ولتاژ نامی‌اش باشد، در جدول (6) سطوح ولتاژ مربوط به ولتاژ بهره‌برداری کابل می‌بایست در نظر گرفته شود.

تذکر: سیم بندی وآرایش تجهیزات و کابل تحت تست می‌بایست مطابق شکل‌های (4) و (5) باشد.

GasPlus.ir

جدول (6): سطوح ولتاژ آزمون کارخانه‌ای و آزمون نگهداری AC-Hipot با فرکانس 50 Hz

ولتاژ نامی بهره‌برداری کابل		آزمون کارخانه‌ای[66]	آزمون نگهداری
فاز به فاز	فاز به زمین	فاز به زمین	ولتاژ موثر فاز به زمین
U [kV]	U_0 [kV]	[kV]	[kV]
1	0,6	3,5	1,5
3	1,8	6,5	3,5
3,3	1,9	6,75	4
6	3,6	12,5	7
6,6	3,8	13,3	7,5
10	6	21	11
11	6,35	22,2	12,5
20	12	42	17,5
22	12,7	44,5	18,5
30	18	63	25
33	19	66,5	27,5

تذکر: همواره بایستی بررسی شود که تجهیزات آزمون قادر به تامین توان مورد نیاز (شارژ خازنی) یک سیستم کابل باشند. لازم به ذکر است که توان شارژ خازنی یک کابل به مقدار خازن کابل (حاصلضرب ظرفیت خازنی طول کابل در طول کابل)، فرکانس ولتاژ آزمون و توان دوم اندازه ولتاژ آزمون بستگی دارد.

GasPlus.ir

[66] این ستون از جدول با هدف مقایسه و بر اساس استاندارد IEC 60502 (بخش مربوط به تست‌های روتین کابل) آورده شده است.

8- آزمون ولتاژ بالای DC موسوم به DC-Hipot

بر اساس استانداردهای IEEE Std 400-2012 و IEC 60502.2-2014 **استفاده از آزمون ولتاژ** DC **بالا موسوم به** DC-Hipot **برای تست و ارزیابی سیستم عایقی کابل‌های قدرت کهنه (با عمر بهره‌برداری بیش از** 5 **سال) از نوع اکسترود شده، خطرناک و در مورد کابل‌های نو و کارکرده نیز توصیه نمی‌شود. بر این اساس در تمامی شرایط حتی در صورت بکارگیری تجهیزات مکانیابی عیب کابل و یا دستگاه اندازه‌گیری مقاومت عایقی کابل، اندازه ولتاژ** DC **و مدت زمان اعمال آن به کابل تا حد امکان می‌بایست کاهش یابد.**

جدول (7): **ولتاژ آزمون** DC-Hipot **برای کابل‌های نو و کارکرده (با عمر بهره‌برداری کمتر از** 5 **سال)**

ولتاژ نامی کابل		آزمون پذیرش[67]	آزمون نگهداری[68]
فاز به فاز	فاز به زمین	فاز به زمین	فاز به زمین
U [kV]	U_0 [kV]	$4 \times U_0$ [kV]	[kV]
1	0,6	2,5	1,5
3,0	1,8	7,2	4,5
3,3	1,9	7,5	5
6	3,6	14,5	9,5
6,6	3,8	15	10
10	6	24	13
11	6,35	25,5	14
20	12	48	21,5
22	12,7	51	22
30	18	72	27
33	19	76	30

GasPlus.ir

[67] مقادیر این ستون (آزمون پذیرش) بر اساس استانداردهای IEC 60502.1-2009 و IEC 60502.2-2005 ارائه شده است.

[68] مقادیر این ستون (آزمون نگهداری) برای موارد با ولتاژ نامی بیش از 5 kV با استفاده از تکنیک درونیابی خطی و بر اساس جدول شماره 100.6.1 استاندارد ANSI/NETA MTS-2011 ارائه شده است.

برای کابل‌های نو و کارکرده (با عمر بهره‌برداری کمتر از 5 سال) و ولتاژ موثر نامی 1 kV و بیشتر انجام آزمون DC-Hipot مجاز بوده[69] و ولتاژ آزمون به سطوح ولتاژ ذکر شده در جدول (7) محدود می‌شود.

مدت زمان اعمال ولتاژ به کابل در آزمون پذیرش DC-Hipot، مطابق استاندارد IEC 60502 برابر 15 دقیقه است. برای آزمون نگهداری DC-Hipot نیز مدت زمان 5 دقیقه پیشنهاد می‌شود.

تذکر-1: در هنگام انجام آزمون نگهداری کابل، در صورتی که ولتاژ بهره‌برداری آن کمتر از ولتاژ نامی‌اش باشد، در جدول (7) سطوح ولتاژ مربوط به ولتاژ بهره‌برداری کابل می‌بایست در نظر گرفته شود.

تذکر-2: سیم بندی وآرایش تجهیزات و کابل تحت تست می‌بایست مطابق شکل‌های (4) و (5) باشد.

تذکر-3: به دلیل DC بودن ولتاژ آزمون، سیستم کابل تا رسیدن به ولتاژ اعمالی نیاز به زمان دارد (زمان شارژ خازنی و شارژ جذبی عایق کابل)، لذا سرعت افزایش ولتاژ اعمالی به کابل بایستی کاملا کنترل شده و بسیار کمتر از حالت آزمون AC باشد (به طور مثال 1000 ولت بر ثانیه). توجه شود که عدم رعایت این نکته ممکن است باعث بروز خطا در تجهیزات آزمون کابل شود.

GasPlus.ir

[69] بدلیل ماهیت خطرناک ولتاژ DC بالا برای کابل‌های قدرت (نو و کهنه)، استفاده از روش‌های جایگزین مانند آزمون VLF توصیه می‌شود.

9- آزمون ولتاژ AC با فرکانس بسیار پایین موسوم به VLF

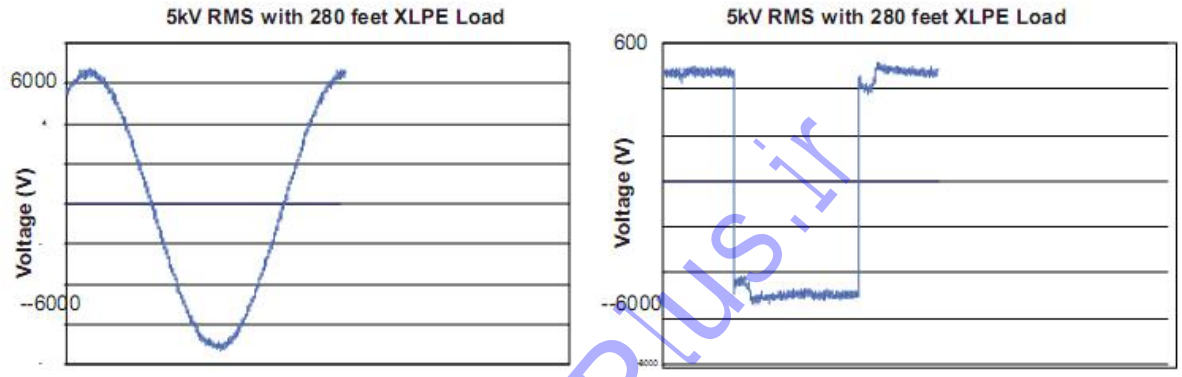
9-1- استاندارد و دستورالعمل نحوه انجام تست

در آزمون VLF از یک ولتاژ متناوب AC در محدوده فرکانس 0,01 Hz تا 1 Hz استفاده می‌شود. در این استاندارد به صورت پیش فرض استفاده از فرکانس 0,1 Hz توصیه می‌شود.

شکل موج ولتاژ خروجی یک دستگاه VLF در حالت کلی می‌تواند به دو صورت باشد:

(1) شکل موج سینوسی[70]

(2) شکل موج مربعی کسینوسی[71]



شکل موج سینوسی 0,1 Hz شکل موج مربعی کسینوسی 0,1 Hz

شکل (2): شکل موج‌های ولتاژ خروجی یک دستگاه VLF

با توجه به تحقیقات صورت گرفته شکل موج سینوسی نسبت به شکل موج مربعی کسینوسی ارجحیت دارد. لذا در این استاندارد تمامی جداول و آزمون‌ها بر اساس شکل موج سینوسی بیان می‌شوند.

اندازه‌گیری ولتاژ آزمون می‌بایست توسط یک سیستم اندازه‌گیری کالیبره شده و تائید شده مطابق استاندارد IEC 60060-3 انجام شود. ولتاژ پیک در آزمون VLF همواره می‌بایست با عدم قطعیت کمتر از $\pm 5\%$ اندازه‌گیری شود و زمان پاسخ سیستم اندازه‌گیر نباید بیشتر از 0,5 ثانیه باشد. اگر نسبت ولتاژ پیک به ولتاژ موثر در محدوده $\sqrt{2} \pm 5\%$ نباشد، باید بررسی شود که پیک مثبت و پیک منفی ولتاژ متقارن بوده و بیش از 2% با هم اختلاف نداشته باشند. این موضوع بسیار حائز اهمیت است که تمامی تجهیزات اندازه‌گیر همواره دارای یک کالیبراسیون معتبر باشند.

طبق استاندارد IEEE Std 400.2 آزمون VLF تنها برای کابل‌های قدرت شیلددار با ولتاژ موثر فاز به فاز 5 kV و بالاتر (نو و کارکرده) مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای تمامی انواع کابل‌ها از جمله موارد زیر آزمون VLF امکانپذیر است:

[70] Sinusoidal waveform

[71] Cosine rectangular waveform

GasPlus.ir

1) کابل‌های اکسترود شده با عایق پلی اتیلن (مانند PE، XLPE و TRXLPE)
2) کابل‌های اکسترود شده با عایق پر شده (مانند Mineral Filled EPR)
3) کابل‌های ورقه ورقه با عایق کاغذی (مانند PILC)

آزمون VLF در حالت کلی با دو روش زیر قابل انجام است:

1) آزمون تحمل ولتاژ عایقی VLF [72]
2) آزمون تشخیصی VLF [73]

هر یک از روش‌های فوق در ادامه به تفصیل شرح داده شده‌اند. با این حال برای کسب اطلاعات بیشتر می‌توان به آخرین نسخه از استاندارد IEEE Std 400.2 مراجعه کرد.

احتیاط: نتایج و اثرات محتملی که در اثر وقوع پدیده شکست عایقی کابل در آزمون ولتاژ بالا ممکن است رخ دهد می‌بایست قبل از انجام چنین تست‌هایی در نظر گرفته شده و تمهیدات لازم در نظر گرفته شود.

9-2-آزمون تحمل ولتاژ عایقی VLF

در این آزمون کابل تحت تست می‌بایست در شرایطی که ولتاژی بزرگتر از سطح ولتاژ عملکردش برای یک بازه زمانی مشخص به آن اعمال شده است، بدون وقوع هرگونه شکست در سیستم عایقی جان سالم به در ببرد. لذا در صورتی که قدرت عایقی کابل و یا متعلقات آن (سرکابل و مفصل) به اندازه کافی تنزل یافته باشند وقوع شکست عایقی در آن محتمل است. در این صورت کابل مورد نظر می‌بایست در نقطه شکست تعمیر و بازسازی شده و مجددا تحت تست قرار گرفته تا اینکه بتواند در آزمون تحمل ولتاژ عایقی قبول شود.

دوره زمانی لازم برای انجام این آزمون به شرح زیر است:

1) کابل کارکرده/کهنه: حداقل زمان پیشنهادی لازم برای انجام این آزمون، 30 دقیقه در فرکانس 0,1 Hz است. در صورتی که کابل تحت آزمون با اهمیت بالا ارزیابی شود (مانند کابل تغذیه ورودی به پست برق) این زمان را می‌توان به 60 دقیقه در فرکانس 0,1 Hz ارتقا داد.
2) کابل نو: حداقل زمان پیشنهادی لازم برای انجام آزمون پذیرش و یا نصب بر روی یک کابل نو، 60 دقیقه در فرکانس 0,1 Hz است.

نکته: در صورتی که ولتاژ بهره‌برداری یک کابل کمتر از ولتاژ نامی کابل باشد، در هنگام انجام آزمون نگهداری سطوح ولتاژ مربوط به ولتاژ بهره‌برداری کابل می‌بایست در نظر گرفته شود.

[72] Withstand testing

[73] Diagnostic testing

GasPlus.ir

جدول (8): ولتاژهای آزمون تحمل ولتاژ عایقی VLF با شکل موج سینوسی[74]

ولتاژ نامی کابل (فاز به فاز)	آزمون نصب (ولتاژ فاز به زمین)	آزمون پذیرش (ولتاژ فاز به زمین)	آزمون نگهداری (ولتاژ فاز به زمین)
[kV rms]	[kV rms]	[kV rms]	[kV rms]
1	2	2,5	1,5
3	5	5,5	4
3,3	5,5	6	4,5
6	9,5	11	8
6,6	10	11,5	8,5
10	13,5	15,5	11,5
11	14,5	16,5	12,5
20	24	26	20
22	26	28,5	21,5
30	34	38	29
33	37	41,5	31,5

نکته: در جدول (8) ولتاژها به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که به منظور جلوگیری از وقوع پدیده شارژهای فضایی[75] **در کابل استرس الکتریکی اعمالی به عایق کمتر از 10 kV/mm باشد.**

تذکر: اگر یک کابل هنگام بهره‌برداری و یا هنگام انجام آزمون دچار شکست عایقی شده و یک کابل نو جایگزین بخشی از کابل قبلی شود، ابتدا و قبل از اجرای مفصل می‌بایست آزمون نصب روی کابل نو انجام شده و پس از اجرای مفصل آزمون نگهداری بر روی کل کابل انجام شود.

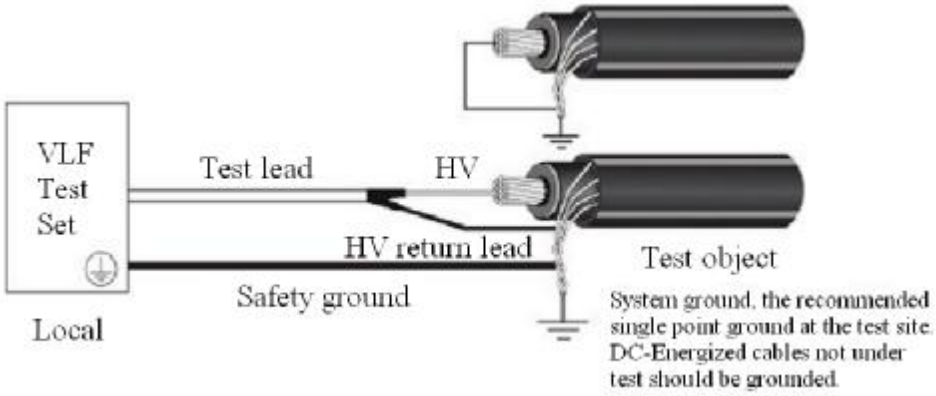
9-2-1- شیوه انجام آزمون

پس از اجرای سیم‌بندی دستگاه VLF و کابل قدرت مطابق شکل (3) و همچنین رعایت تمام نکات ایمنی و فواصل مجاز مطابق با استانداردهای IEEE Std 510 و NFPA 70E، ولتاژی مطابق با جدول (8) به کابل اعمال می‌شود. در صورتیکه کابل یا سیستم کابل در این آزمون قبول شد، ولتاژ دستگاه VLF می‌بایست بر روی صفر تنظیم شود تا مجموعه کابل و دستگاه کاملا دشارژ شوند. پس از دشارژ کامل، کابل یا سیستم کابل می‌بایست زمین شوند.

[74] مقادیر این جدول برای ردیف‌های با ولتاژ نامی بیش از 5 kV با استفاده از تکنیک درونیابی خطی و بر اساس جدول شماره 3 استاندارد IEEE Std 400.2-2013 ارائه شده است.

[75] Space charges

GasPlus.ir

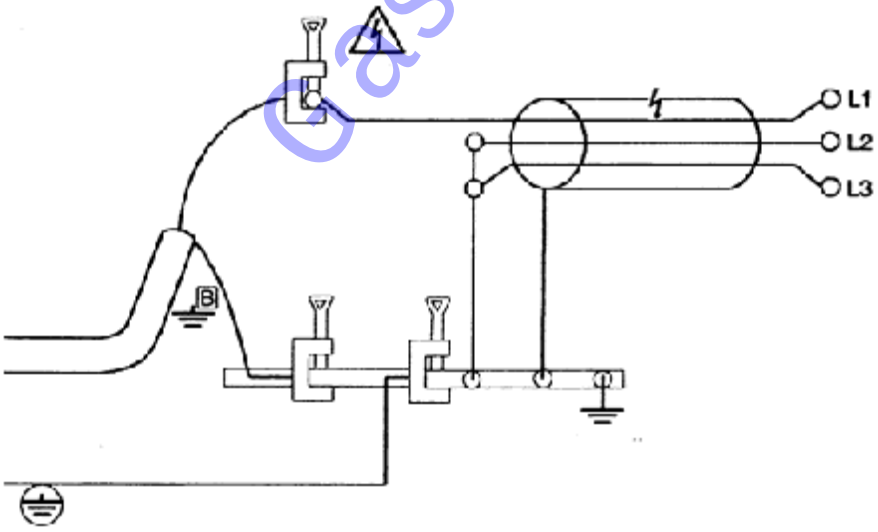


شکل (3): نحوه سیم‌بندی دستگاه VLF و کابل‌های قدرت[76]

در صورتیکه در حین انجام آزمون عایق کابل دچار شکست شود، دستگاه VLF خاموش می‌شود تا کابل و دستگاه را دشارژ کند. در این حالت مقدار ولتاژ شکست و زمان وقوع شکست (از لحظه اعمال ولتاژ آزمون) می‌بایست ثبت شوند. در حین انجام تست در صورت امکان جریان نشتی کابل نیز می‌تواند ثبت شود. سپس کابل می‌بایست زمین شود. محل وقوع شکست در کابل را می‌توان با استفاده از تجهیزات استاندارد مکانیابی عیب شناسایی کرد. کابل معیوب را می‌توان تعمیر کرده یا با کابل نو جایگزین نمود. توجه داشته باشید زمانی که سیستم کابل بتواند آزمون تحمل ولتاژ عایقی را بگذراند می‌تواند به وضعیت بهره‌برداری عادی خود برگردد.

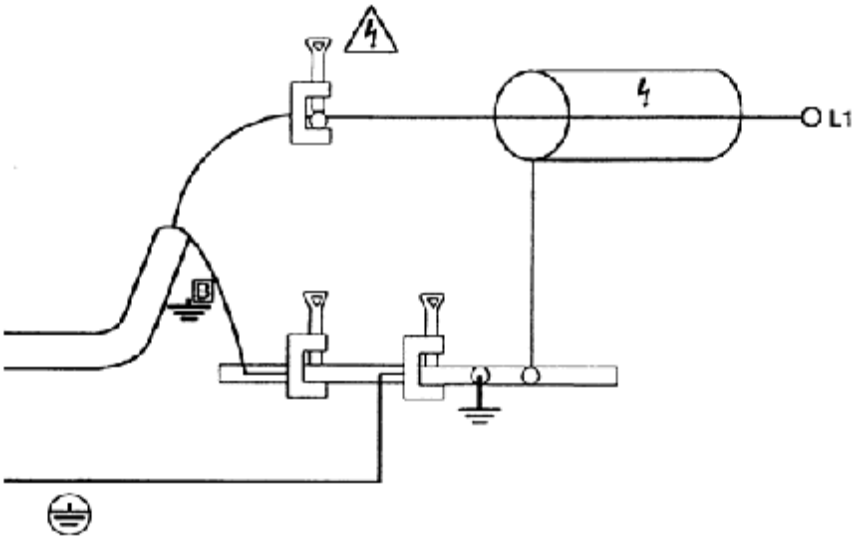
9-2-2- اتصال کابل به دستگاه VLF

شکل‌های (4) تا (6) نحوه اتصال کابل‌های مختلف را به دستگاه یک VLF نشان می‌دهد.

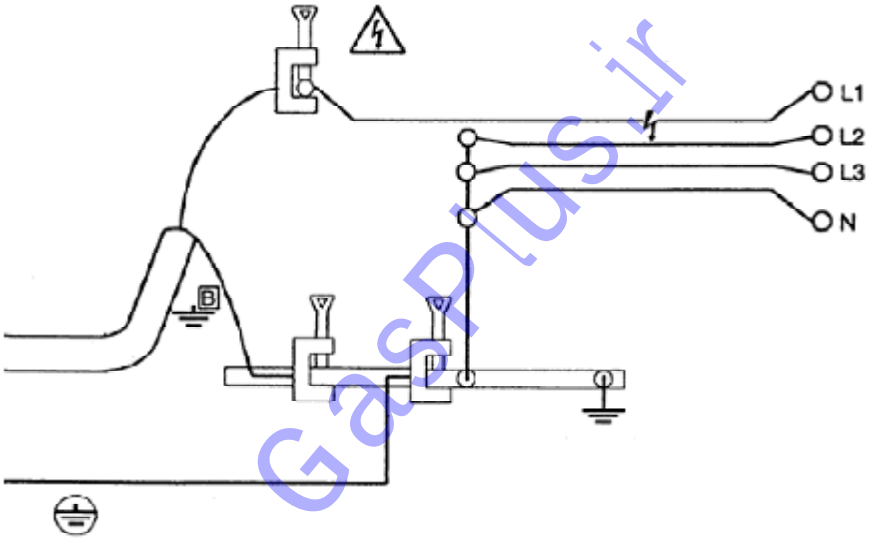


شکل (4): نحوه اتصالات یک کابل سه فاز شیلددار به دستگاه تست Hipot

[76] مطابق شکل شماره 1 استاندارد IEEE Std 400.2-2013



شکل (5): نحوه اتصالات یک کابل تکفاز شیلددار به دستگاه تست Hipot



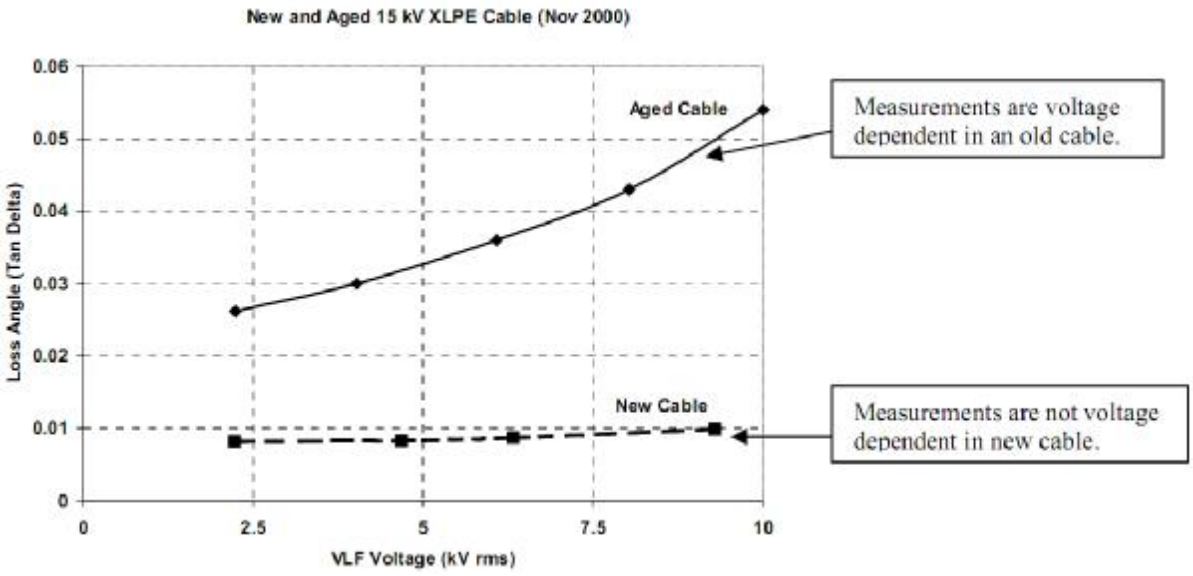
شکل (6): نحوه اتصالات یک کابل غیر شیلددار به دستگاه تست Hipot

3-9- آزمون تشخیصی VLF

آزمون‌های تشخیصی میزان نسبی تنزل کیفیت و قدرت سیستم عایقی یک کابل را مشخص کرده و در نتیجه وضعیت کابل را برای بهره‌برداری بهتر ارزیابی می‌کنند.

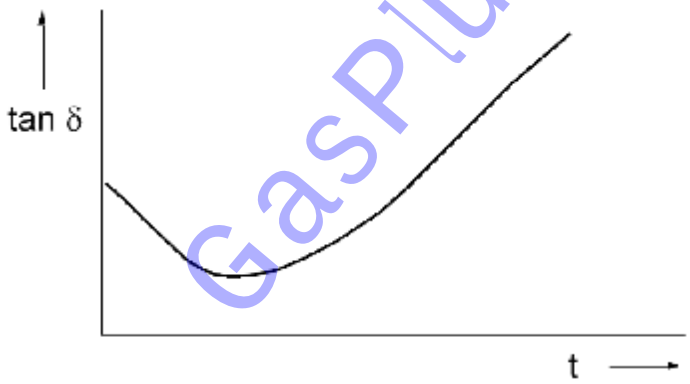
باید یادآوری شود که مقادیر به دست آمده در فرکانس‌های مختلف آزمون VLF قابل تبدیل و اصلاح نبوده و تنها نتایج و اطلاعات بدست آمده در یک فرکانس قابل مقایسه و ارزیابی با یکدیگر می‌باشند.

GasPlus.ir



شکل (7): منحنی تغییرات تانژانت دلتا در آزمون VLF بر حسب ولتاژ اعمالی برای یک کابل نو و یک کابل کارکرده/کهنه

همانطور که در شکل (7) دیده می‌شود در یک کابل نو و در کابل‌هایی که میزان کهنگی آن‌ها کم است، پارامتر تانژانت دلتا با افزایش ولتاژ اعمالی به کابل تغییرات زیادی ندارد. هرچه کابل کهنه‌تر می‌شود با افزایش ولتاژ اعمالی به کابل پارامتر تانژانت دلتا تغییرات چشمگیرتری دارد.



شکل (8): نحوه تغییرات پارامتر تانژانت دلتای یک کابل با افزایش طول عمر بهره‌برداری

همانطور که در شکل (8) ملاحظه می‌شود، با افزایش طول عمر بهره‌برداری از یک کابل، در ابتدا پارامتر تانژانت دلتای آن ممکن است کاهش یافته ولی در ادامه به مرور زمان این پارامتر افزایش می‌یابد.

روش‌های تشخیصی مختلفی را می‌توان همراه با آزمون VLF به کار برد که در این استاندارد تنها به 3 مورد از مهمترین و کاربردی‌ترین آن‌ها اشاره می‌شود (اطلاعات بیشتر در استاندارد IEEE STd 400.2 موجود است):

1) **اندازه‌گیری تانژانت دلتای VLF**[77] **(موسوم به VLF-TD)**

[77] VLF tangent delta measurement

GasPlus.ir

2) اندازه‌گیری تانژانت دلتای تفاضلی VLF[78] (موسوم به VLF-DTD)
3) پایداری زمانی تانژانت دلتای VLF[79] (موسوم به VLF-TDTS)

9-3-1- شیوه انجام آزمون

پس از نصب تجهیزات شامل ژنراتور تولید موج VLF و سیستم اندازه‌گیری تانژانت دلتا در یک سر کابل، با در نظر گرفتن تمامی شرایط و ملاحظات ایمنی، انجام آزمون به شرح زیر صورت می‌گیرد. به طور معمول در تمامی آزمون‌های تشخیصی کاربردی که در سایت انجام می‌شود، از تمیز بودن تمامی سرکابل‌ها و قرار داشتن در یک شرایط فیزیکی خوب مطمئن شوید.

اگر قرار است که آزمون تحمل ولتاژ عایقی بر روی کابل صورت بگیرد، ابتدا می‌بایست آزمون‌های تشخیصی تانژانت دلتای VLF بر روی کابل انجام شود. این کار موجب می‌شود تا اطلاعات لازم در مورد وضعیت کابل بدست آید و لذا با توجه به شرایط کابل، مدت زمان آزمون تحمل ولتاژ عایقی تعیین شود.

این آزمون می‌بایست در ولتاژهای $0.5\times U_0$، U_0 و $1.5\times U_0$ انجام شود. در صورت نیاز، ادامه افزایش ولتاژ تا حد ولتاژ آزمون تحمل عایقی کابل مطابق جدول (8) در پله‌های $0.5\times U_0$ امکان پذیر است. در هر پله حداقل 6 مرتبه باید مقدار تانژانت دلتا و در فاصله‌های زمانی 10 ثانیه (معادل یک سیکل کامل در موج ولتاژ با فرکانس 0,1 Hz) ثبت شود. در صورتیکه در طول فرآیند این آزمون، از ولتاژ کم به ولتاژ زیاد، تغییراتی زیادی در مقادیر TD در مقایسه با آزمون‌های گذشته مشاهده شود و یا ناپایداری (افزایش و کاهش) بیش از اندازه در مقادیر TD در طول زمان فرآیند انجام تست مشاهد شود، بهتر است ولتاژ آزمون را بالاتر نبرد و در همان ولتاژ پایین وضعیت کابل را بیشتر بررسی کرد.

با توجه به تاثیرگذاری دما بر روی مقادیر اندازه‌گیری شده، پیشنهاد می‌شود تا دمای کابل در هنگام آزمون اندازه‌گیری و ثبت شود.

9-3-2- معیارهای ارزیابی برای کابلهای کارکرده/کهنه

جدول‌های (9) و (10) مقادیر لازم برای ارزیابی وضعیت یک کابل کارکرده/کهنه با توجه به نتایج بدست آمده از آزمون تشخیصی VLF را برای سیستم‌های عایقی مختلف نشان می‌دهند.

جدول (9): مقادیر مورد نیاز در آزمون تشخیصی جهت ارزیابی وضعیت یک کابل کارکرده/کهنه ازنوع اکسترود شده با عایق پلی اتیلن (مانند PE، XLPE و TRXLPE)[80]

نوع آزمون تشخیصی	VLF-TD		VLF-DTD		VLF-TDTS
شاخص آزمون	$\overline{TD}$		*DTD*		*STDEV*
ولتاژ آزمون	U_0		بین $0.5\ U_0$ و $1.5\ U_0$		U_0
واحد	$[10^{-3}]$		$[10^{-3}]$		$[10^{-3}]$

[78] VLF differential tangent delta (or tip up) measurement

[79] VLF tangent delta temporal stability

[80] مطابق جدول شماره 4 استاندارد IEEE Std 400.2-2013

GasPlus.ir

نیاز به اقدام ندارد	کوچکتر از 4	و	کوچکتر از 5	و	کوچکتر از 0,1
بررسی بیشتر توصیه می‌شود	بین 4 تا 50	یا	بین 5 تا 80	یا	بین 0,1 تا 0,5
نیاز به اقدام دارد	بزرگتر از 50	یا	بزرگتر از 80	یا	بزرگتر از 0,5

مطابق با این جداول، کابل‌ها با کمک سه شاخص مختلف ارزیابی شده و از لحاظ کیفیت در سه گروه جای می‌گیرند. در ادامه هر کدام از این شاخص‌ها و گروه‌ها تعریف می‌شوند.

9-3-3- نحوه محاسبه شاخص‌های ارزیابی

(1) تانژانت دلتای متوسط ($\overline{TD}$)

این شاخص به صورت میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده تانژانت دلتا در ولتاژ U_0 محاسبه می‌شود:

$$\overline{TD} = \frac{\sum_{i=1}^{n} TD_i}{n} \quad (7)$$

که در آن $\overline{TD}$ مقدار تانژانت دلتا متوسط، TD و n به ترتیب تانژانت دلتا و تعداد مرتبه‌های اندازه‌گیری را نشان می‌دهند.

(2) تانژانت دلتای تفاضلی (DTD)

این شاخص از تفاضل مقدار تانژانت دلتای متوسط در ولتاژ آزمون $0.5\times U_0$ از مقدار تانژانت دلتای متوسط در ولتاژ آزمون $1.5\times U_0$ بدست می‌آید:

$$DTD = \overline{TD}(1.5U_0) - \overline{TD}(0.5U_0) \quad (8)$$

(3) پایداری زمانی تانژانت دلتا ($STDEV$)

این شاخص میزان پایداری و ثابت ماندن مقدار تانژانت دلتای کابل را در مدت زمان انجام آزمون و در ولتاژ آزمون ثابت برابر U_0 نشان می‌دهد:

$$STDEV = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(TD_i - \overline{TD}\right)}{(n-1)}} \quad (9)$$

از نظر اهمیت شاخص‌های ارزیابی، شاخص پایداری زمانی تانژانت دلتا ($STDEV$) مهمتر از دو شاخص دیگر بوده و پس از آن شاخص تانژانت دلتای تفاضلی (DTD) مهم است. شاخص تانژانت دلتای متوسط ($\overline{TD}$) از درجه اهمیت کمتری برخوردار می‌باشد.

GasPlus.ir

جدول (10): مقادیر مورد نیاز در آزمون تشخیصی VLF جهت ارزیابی وضعیت یک کابل کارکرده/کهنه از نوع اکسترود شده با عایق پر شده (مانند Mineral Filled EPR)[81]

نوع آزمون	سیستم عایق پر شده	VLF-TD		VLF-DTD		VLF-TDTS
ولتاژ آزمون		U_0		بین $0.5\ U_0$ و $1.5\ U_0$		U_0
واحد		$[10^{-3}]$		$[10^{-3}]$		$[10^{-3}]$
نیاز به اقدام ندارد	نوع عایق پر شده غیر قابل شناسایی	<35	و	<5	و	<0,1
	Carbon-filled (Black) EPR	<20		<4		<0,1
	Mineral-filled (Pink) EPR	<20		<4		<0,1
	Discharge resistant EPR	<100		<6		<0,1
	Mineral-filled XLPE	<100		-		-
بررسی بیشتر توصیه می‌شود	نوع عایق پر شده غیر قابل شناسایی	35 تا 120	یا	5 تا 100	یا	0,1 تا 1,3
	Carbon-filled (Black) EPR	20 تا 100		2 تا 120		0,1 تا 2,7
	Mineral-filled (Pink) EPR	20 تا 100		4 تا 120		0,1 تا 1
	Discharge resistant EPR	100 تا 350		6 تا 10		0,1 تا 1
	Mineral-filled XLPE	100 تا 350		-		-
نیاز به اقدام دارد	نوع عایق پر شده غیر قابل شناسایی	>120	یا	>100	یا	>1,3
	Carbon-filled (Black) EPR	>100		>120		>2,7
	Mineral-filled (Pink) EPR	>100		>120		>1
	Discharge resistant EPR	>350		>120		>1
	Mineral-filled XLPE	>350		-		-

9-3-4- حالت‌های مختلف وضعیت کابل

(1) حالت "نیاز به اقدام ندارد"[82]

به این معنی است که هر چند در حال حاضر کابل در وضعیت مناسب قرار دارد، ولی به منظور ارزیابی آن باید در دوره‌های زمانی مختلف مورد آزمون مجدد قرار بگیرد.

[81] مطابق جدول شماره 5 استاندارد IEEE Std 400.2-2013

[82] No action required

GasPlus.ir

(2) حالت "بررسی بیشتر توصیه می‌شود[83]"

به این معناست که جهت ارزیابی وضعیت کابل نیاز به جمع‌آوری اطلاعات بیشتری است. مثلا میزان خطاهایی که کابل در گذشته داشته و یا انجام آزمون‌های تشخیصی دیگر و یا حتی آزمون در بازه‌های زمانی کوتاهتر در آینده تکرار شود.

(3) حالت "نیاز به اقدام دارد[84]"

به این معناست که کابل در وضعیت بسیار بدی قرار داشته و جهت تعمیر یا تعویض کابل بلافاصله پس از آزمون یا در یک آینده نزدیک می‌بایست اقدام شود.

GasPlus.ir

[83] Further study advised

[84] Action required

10- آزمون تخلیه جزئی (PD) آنلاین و آفلاین

بسیاری ار عیوب کابل به صورت فعالیت‌های تخلیه جزئی خود را نشان می‌دهند. وقوع پدیده PD و استمرار آن منجر به وقوع خطا در کابل خواهد شد. لذا شناسایی PD و پایش میزان فعالیت‌های آن اطلاعات بسیار ارزشمندی از وضعیت سلامت سیستم عایقی کابل به دست می‌دهد. اندازه‌گیری فعالیت‌های PD با دو روش (1) الکتریکی و (2) صوتی[85] امکان پذیر است. در روش اول فعالیت‌های PD با استفاده از سنسورهای القایی و خازنی پایش می‌شوند. وجود نویزها و پارازیت‌ها بویژه در محیط‌های صنعتی، اندازه‌گیری با این روش را در بیشتر مواقع سخت و گاهاً غیر ممکن می‌کند. به کمک این روش می‌توان به محل وقوع فعالیت‌های PD پی برد و از آنجا که عیوب مختلف در کابل، الگوی PD مختلفی دارند لذا نوع عیبی که در کابل ایجاد شده است نیز به کمک این روش قابل شناسایی خواهد بود.

روش دوم یعنی اندازه‌گیری صوتی مشکل پیش گفته نویز و پارازیت الکترومغناطیسی موجود در محیط‌های صنعتی را ندارد. با این حال بعلت تضعیف شدید امواج صوتی در بعد مسافت عملا استفاده از این تکنیک تنها برای بخش‌هایی از کابل امکان پذیر است که در دسترس هستند، مانند سرکابل‌ها و غیره.

برای انجام آزمون PD به صورت آفلاین، کابل تحت تست می‌بایست توسط یک ولتاژ AC تغذیه شود. لذا این استاندارد با در نظر گرفتن مجموعه آزمون‌های شرح داده شده در بخش‌های قبلی و در جهت تکمیل آن‌ها پیشنهاد می‌کند تا از منبع تغذیه VLF برای انجام آزمون آفلاین PD استفاده شود. اطلاعات بیشتر، از جمله نحوه انجام آزمون در استاندارد IEEE Std 400.3-2006 آورده شده است.

باید توجه شود که PD یک پدیده اتفاقی[86] است. به عبارت دیگر مجموعه‌ای از شرایط می‌بایست فراهم شود تا این پدیده شروع به فعالیت کند. لذا در مطالعات مبتنی بر اندازه‌گیری و پایش فعالیت‌های PD فاکتور "*بازه زمانی آزمون*" از اهمیت بالایی برخوردار است.

آزمون اندازه‌گیری PD جزو معدود آزمون‌هایی است که به صورت آنلاین و بر روی یک کابل زنده و در حال بهره‌برداری قابل انجام است. لذا این استاندارد استفاده از آزمون آنلاین تخلیه جزئی را برای کابل‌های با درجه اهمیت بالا (بویژه در مواردی که خارج کردن کابل از سرویس در بازه‌های زمانی کمتر از 2 سال امکان پذیر نباشد)، توصیه می‌کند.

[85] Acoustic

[86] Stochastic

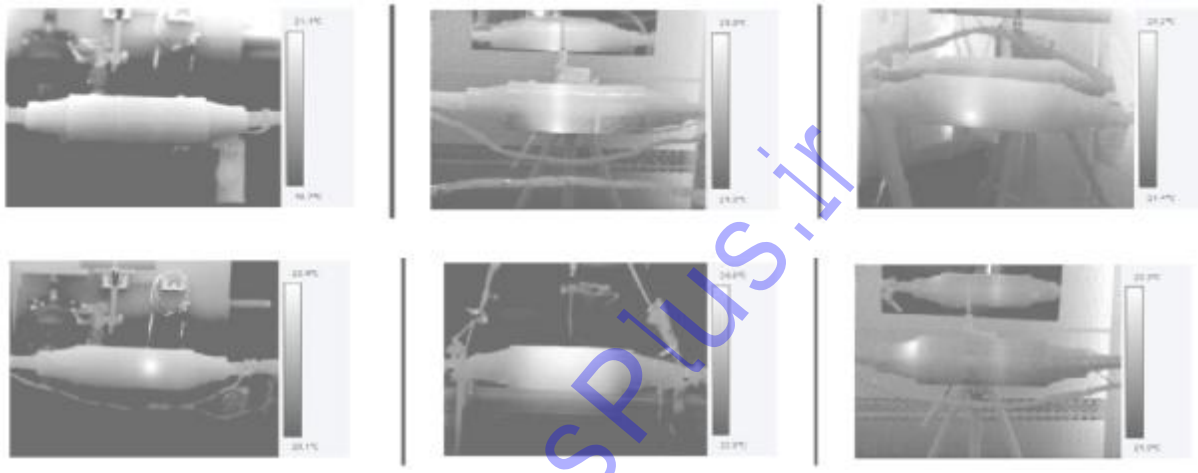
GasPlus.ir

11- آزمون عکس برداری مادون قرمز یا ترموگرافی[87]

هر چند آزمون عکس‌برداری مادون قرمز حرارتی به طور مستقیم خصوصیات دی‌الکتریک سیستم کابل را اندازه‌گیری و ارزیابی نمی‌کند، با این حال در این استاندارد از این روش بعنوان یک آزمون تکمیلی برای کابل‌هایی که در دسترس هستند یاد می‌شود.

به کمک این آزمون می‌توان وضعیت ملحقات کابل نظیر مفصل و سرکابل را بوسیله پایش دمای سطح آن‌ها ارزیابی کرد. اتصالات با مقاومت بالا و دمای زیاد غیرعادی ناشی از تلفات دی‌الکتریک ناحیه‌ای[88] در بخش‌هایی از سرکابل و مفصل را به کمک این روش می‌توان شناسایی کرد.

ویژگی ممتاز روش ترموگرافی، ایمنی بالا مخصوصا در ولتاژهای فشار قوی، آنلاین بودن و غیر مخرب بودن آن است.



شکل (9): مثال‌هایی از اندازه گیری مادون قرمز حرارتی یک جز معیوب

(بالا چپ: بدون عیب (نمونه مرجع)، بالا وسط: ناحیه گرم به شکل دایره با افزایش دمای[89] بیش از 0,2°C، بالا راست: نقطه داغ[90] به صورت ناحیه‌ای دایره‌ای شکل با افزایش دمای بیش از 1,0°C، پایین چپ: یک نقطه داغ منفرد با افزایش دمایی بیش از 1,0°C، پایین وسط: مفصل با بدنه گرم با افزایش دمای بیش از 1,0°C، پایین راست: تطبیق‌دهنده کابل[91] با افزایش دمای بیش از 1,0°C)

GasPlus.ir

[87] متن این بخش از استاندارد IEEE Std 400-2012 بخش 6.5 آورده شده است.

[88] Localized dielectric losses

[89] T°rise

[90] Hot spot

[91] Cable adapter

پیوست 1- آزمون‌های عایقی برای سیستم‌های کابل با عایق کاغذی

تمامی آزمون‌هایی که در این استاندارد شرح آن رفته بر روی کابل‌های با عایق کاغذی قابل انجام است، بعلاوه اینکه این نوع از کابل‌ها محدودیت آزمون DC-Hipot را ندارند. در ادامه برای انجام آزمون‌های مختلف بر روی کابل‌های با عایق کاغذی استانداردهای معتبری معرفی شده‌اند:

1) **آزمون DC-Hipot بر اساس استاندارد IEEE Std 400.1-2007 برای کابل‌های با عایق کاغذی، از نوع شیلددار با ولتاژ نامی بزرگتر از 5 kV.**
2) **آزمون VLF بر اساس استاندارد IEEE Std 400.2-2013 برای کابل‌های با عایق کاغذی، از نوع شیلددار با ولتاژ نامی بزرگتر از 5 kV.**
3) **آزمون تخلیه جزئی (PD) بر اساس استاندارد IEEE Std 400.3-2006 برای کابل‌های با عایق کاغذی، از نوع شیلددار با ولتاژ نامی بزرگتر از 5 kV.**

GasPlus.ir

پیوست 2- شناسنامه کابل

شرکت ملی گاز ایران برگه تست شیت آزمون عایقی کابل قدرت مبتنی بر استاندارد IGS شناسنامه کابل			
تاریخچه ویرایش شناسنامه کابل:			
	1	2	3
تاریخ ویرایش:			
نام و نام خانوادگی ویرایشگر:			
علت ویرایش:			

مشخصات کابل:			محل نصب کابل:	
شماره شناسایی (Tag ID) کابل:			محل اتصال سرهای انتهای کابل:	
جریان نامی بهره‌برداری کابل:			از	به
ولتاژ نامی بهره‌برداری کابل (U/U0):				

طول بخشهای مختلف کابل بر اساس نوع محل نصب:							
	ترانشه	کاندویت	هوای آزاد	دفن در خاک	سینی		کل
طول سیستم کابل:							

نوع و مشخصات بخشهای مختلف کابل:							
	سرکابل 1	کابل 1	مفصل 1	کابل 2	مفصل 2	کابل 3	سرکابل 2
نوع:							

GasPlus.ir

ولتاژ نامی (U/U0):							
تاریخ ساخت یا خرید:							
تاریخ نصب:							
طول:							

تاریخچه تستهای انجام شده روی کابل:

ردیف	تاریخ	نوع تست	نام آزمونها	شماره برگه تست شیت
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

توضیحات مرتبط با شناسنامه کابل:

ردیف	تاریخ	توضیحات
1		
2		
3		
4		
5		

GasPlus.ir

پیوست 3- برگه تست شیت آزمون اندازه گیری مقاومت عایقی (IR) با اعمال ولتاژ DC

شرکت ملی گاز ایران

برگه تست شیت آزمون عایقی کابل قدرت مبتنی بر استاندارد IGS

آزمون اندازه گیری مقاومت عایقی (IR) با اعمال ولتاژ DC

مشخصات کلی آزمون عایقی کابل:

شماره برگه تست شیت:	**شماره مجوز یا Permit:**
محل تست:	**شماره شناسایی (Tag ID) کابل:**

اطلاعات محیطی پیرامون کابل تحت تست:

پارامتر / بخش های کابل	1	2	3	4	5	6	7	**کل**
طول								
دمای عایق کابل								
دمای محیط								
رطوبت هوا								
فشار هوا								

مشخصات تجهیز آزمون اندازه گیری مقاومت عایقی:

نام و شماره مدل:	**شماره سریال:**	**تاریخ کالیبراسیون:**

مشخصات ولتاژ آزمون اندازه گیری مقاومت عایقی:

سطح ولتاژ:		**زمان اعمال ولتاژ:**		**نوع آزمون:**

آزمون اندازه گیری IR:

		15 ثانیه	30 ثانیه	45 ثانیه	1 دقیقه	1,5 دقیقه	2 دقیقه	3 دقیقه	4 دقیقه	5 دقیقه
مقدار IR										
فاز به فاز	**فاز R**									

GasPlus.ir

	فاز S									
	فاز T									
	نول N									
فاز به زمین	فاز R									
	فاز S									
	فاز T									
	نول N									

توضیحات نتیجه آزمون و وضعیت عایق کابل:	
1	
2	
3	
4	

مشخصات کارشناسان آزمون:

	نام و نام خانوادگی	تاریخ	امضا
مشخصات تکنسین تست کننده			
مشخصات کارشناس تائید کننده			

GasPlus.ir

پیوست 4- برگه آزمون (تست شیت) با ولتاژ AC در فرکانس بسیار پایین موسوم به VLF

شرکت ملی گاز ایران **برگه آزمون عایقی کابل قدرت مبتنی بر استاندارد IGS** **آزمون با ولتاژ AC در فرکانس بسیار پایین موسوم به VLF**								
مشخصات کلی آزمون عایقی کابل:								
شماره برگه آزمون:							**شماره مجوز یا Permit:**	
محل تست:							**شماره شناسایی (Tag ID) کابل:**	
اطلاعات محیطی پیرامون کابل تحت تست:								
پارامتر / بخش های کابل	1	2	3	4	5	6	7	کل
طول								
دمای عایق کابل								
دمای محیط								
رطوبت هوا								
فشار هوا								
مشخصات تجهیز آزمون تشخیصی VLF:								
نام و شماره مدل:			**شماره سریال:**				**تاریخ کالیبراسیون:**	
مشخصات ولتاژ آزمون VLF:								
سطح پیک ولتاژ			**زمان اعمال ولتاژ**			**شکل موج ولتاژ**		
سطح موثر ولتاژ			**فرکانس آزمون**			**نوع آزمون:**		

GasPlus.ir

آزمون تشخیصی **VLF**:

ولتاژ آزمون		فاز	مقدار Tan δ / ثانیه						TD	STDEV
			10	20	30	40	50	60		
آزمون 1	0.5×Uo	R							0	!DIV/0#
		S							0	!DIV/0#
		T							0	!DIV/0#
		N							0	!DIV/0#
آزمون 2	1×Uo	R							0	!DIV/0#
		S							0	!DIV/0#
		T							0	!DIV/0#
		N							0	!DIV/0#
آزمون 3	1.5×Uo	R							0	!DIV/0#
		S							0	!DIV/0#
		T							0	!DIV/0#
		N							0	!DIV/0#
آزمون 4	2×Uo	R							0	!DIV/0#
		S							0	!DIV/0#
		T							0	!DIV/0#
		N							0	!DIV/0#
آزمون 5	نامی ولتاژ	R							0	!DIV/0#
		S							0	!DIV/0#
		T							0	!DIV/0#
		N							0	!DIV/0#

تذکر: آزمون 4 در صورتی انجام شود که ولتاژ این آزمون از مقدار ولتاژ آزمون 5 کمتر باشد.

GasPlus.ir

نتیجه نهایی آزمون تشخیصی VLF:					
نتیجه آزمون	فاز	TD	DTD	STDEV	نتیجه / وضعیت
	R	0	0	#DIV/0!	
	S	0	0	#DIV/0!	
	T	0	0	#DIV/0!	
	N	0	0	#DIV/0!	

نتیجه آزمون تحمل عایقی VLF:

نتایج حاصله از آزمون: قبول یا رد شدن:	
سطح ولتاژی که کابل در آزمون رد شده است:	
مدت زمانی که کابل تحت ولتاژ آزمون قرار داشته تا خطای کابل اتفاق افتاده است:	
اجزایی از سیستم کابل که در هنگام آزمون دچار عیب شده‌اند (شناسایی و مکان آن):	

مشخصات کارشناسان آزمون:

	نام و نام خانوادگی	تاریخ	امضا
مشخصات تکنسین تست کننده			
مشخصات کارشناس تائید کننده			

GasPlus.ir