СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ И ДИАГНОСТИКИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ КАБЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

АВТОРЫ:

РОГИР ЙОНГЕН
(ROGIER JONGEN),
ONSITE HV SOLUTIONS AG,
ШВЕЙЦАРИЯ

ЭДВАРД ГУЛЬСКИ
(EDWARD GULSKI),
ONSITE HV SOLUTIONS AG,
ШВЕЙЦАРИЯ

ГРЕГОР ЧЕЙКА
(GREGOR CEJKA),
ONSITE HV
INTERNATIONAL AG,
ШВЕЙЦАРИЯ

Современные методы испытаний и диагностики силовых кабелей напряжением до 240 кВ на месте их эксплуатации включают в себя испытания под напряжением, обнаружение частичного разряда и измерения коэффициента диэлектрических потерь. Помимо метода непрерывной подачи переменного напряжения, все большее внимание привлекает метод подачи затухающего переменного напряжения. В данной статье рассматриваются современные решения, используемые в силовой электронике и системах обработки сигналов, а также методы распространяющиеся на системы, в которых создается затухающее переменное напряжение уровнем до 350 кВ.

Ключевые слова: высоковольтные испытания, затухающие колебания, затухающее переменное напряжение, ДАЦ, БАУР, ОВТС.

Система DAC HV40 (для кабелей до 500 кВ) при испытаниях высоковольтной кабельной системы в Сингапуре

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что изоляция силового кабеля может нарушаться при подаче нормального рабочего напряжения или при переходных процессах вследствие грозового или коммутационного перенапряжения. Большинство отказов возникает, когда локальные электростатические напряжения становятся выше диэлектрической прочности изоляционных материалов на участке с местным напряжением либо при общем ухудшении свойств диэлектриков, когда они уже не выдерживают подаваемое напряжение. Поэтому вместе с приемо-сдаточными и периодическими испытаниями проводятся испытания непосредственно на месте эксплуатации (включая диагностические измерения, например, частичных разрядов), направленные на повышение надежности силовых кабелей [1-10]. В частности, испытания на месте эксплуатации (рис. 1) проводятся для определения двух характеристик кабельной линии:

- состояние и сохранность кабельной системы;
- работоспособность и надежность кабельной цепи.

В целом применяется один из двух следующих общепринятых порядков приемо-сдаточных испытаний вновь смонтированных или отремонтированных цепей:

- испытания на электрическую прочность под воздействием повышенного напряжения величиной 1,5...6 U_o, создаваемого в объекте испытания в течение, например, 1 часа, либо
- испытание повышенным напряжением 1 U_o (номинальное), подаваемым в течение 24 часов.

В первом случае считается, что хорошо сохранившаяся изоляция (не имеющая изъянов и/или признаков старения в процессе эксплуатации) может выдержать превышение напряжения намного выше номинального уровня, и что в случае с имеющимися нарушениями изоляции или нарушениями вследствие старения в процессе эксплуатации порог сопротивляемости перенапряжению снижается. Это приводит к пробою при напряжении выше номинального в течение заданной длительности испытаний. Результаты таких испытаний однозначны: пройдено или не пройдено.

Как известно, при испытаниях на электрическую прочность под воздействием повышенного напряжения без контроля других показателей, например, наличия частичных разрядов, не всегда можно выявить все нарушения, допущенные в процессе изготовления и монтажа. Более того, необходимо принимать во внимание следующее:

- в связи с подачей испытательного напряжения, уровень которого выше номинального, само испытание может привести к повреждениям, даже если дефекты не выявлены;

ПРИМЕР ИСПЫТАНИЯ НА МЕСТЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПУТЕМ ПОДАЧИ СИНУСОИДАЛЬНЫХ ЗАТУХАЮЩИХ ПЕРЕМЕННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

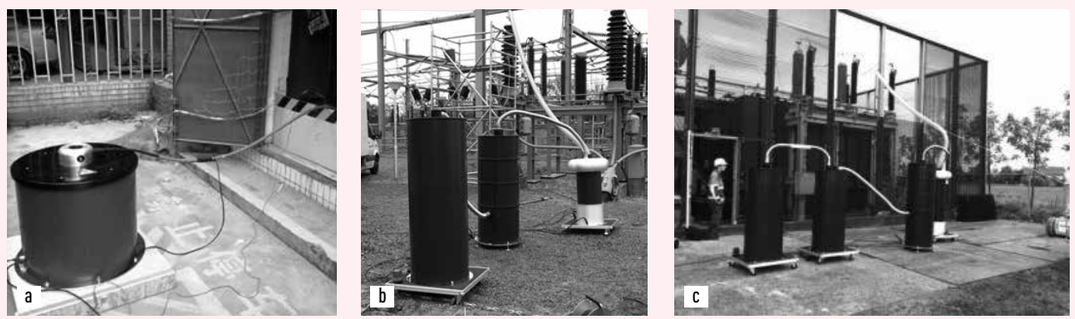


Рис. 1. (a) после укладки с подачей затухающего переменного напряжения 28 кВ на 10-киловольтный СПЭ-кабель; (b) диагностические испытания с подачей затухающего переменного напряжения 190 кВ на 8-километровый маслонаполненный, изношенный в процессе эксплуатации кабель, номинальным напряжением 150 кВ; (c) после укладки с подачей затухающего переменного напряжения 270 кВ на СПЭ-кабель протяженностью 6 км, номинальным напряжением 150 кВ.

ИСПЫТАНИЯ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ НА МЕСТЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОДАЧЕЙ ЗАТУХАЮЩЕГО ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ [7]

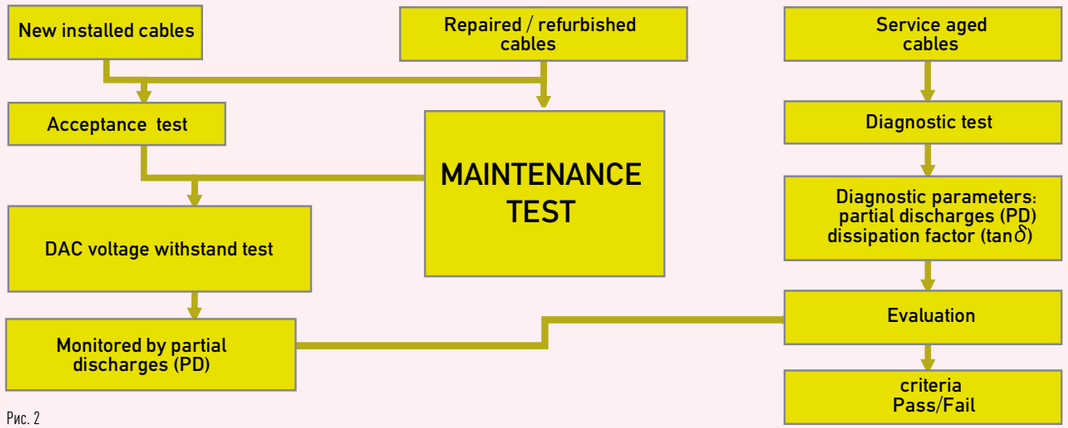


Рис. 2

- несмотря на то что длительность испытания повышенным напряжением определяется эмпирическим путем (например 1 час), нельзя исключать возникновения отказа уже, скажем, через 1 час и 10 минут.

Были случаи, когда кабели успешно проходили испытания на электрическую прочность под воздействием повышенного напряжения и затем возникали отказы уже в начале эксплуатации (в период до нескольких месяцев) [5, 6]. Обнаружено, что причиной таких отказов становятся нарушения изоляции в кабелях и соответствующих комплектующих. Поэтому для обнаружения слабых мест в изоляции кабелей и комплектующих после монтажа или ремонта кабелей в настоящее время всё большее распространение получила практика определения состояния изоляции в ходе испытаний на месте эксплуатации (т. н. контролируемое испытание) — см. пример на рис. 2. Как известно, контролируемое испытание включает в себя испытание на электрическую прочность под воздействием повышенного напряжения в сочетании с диагностическим испытанием, например, измерением частичных разрядов.

В диагностических испытаниях перенапряжение (выше уровня U0) может оказать значительное негативное воздействие на остаточный срок службы конкретного сегмента кабеля. Учитывая это, чрезвычайно важно выполнять точную диагностику при уровнях напряжения до U0 и выше. На практике подобные методики становятся всё более привлекательными, когда доступны современные средства испытаний на месте эксплуатации, характеризующиеся следующим:

- малый вес системы диагностики и удобство транспортировки;
- компактность системы диагностики при высоком выходном напряжении;
- удобство сборки системы и подачи напряжения;
- низкое потребление электроэнергии при испытаниях кабелей большой протяженности;
- возможность точного определения частичных разрядов и измерения коэффициента диэлектрических потерь.

В данной статье рассмотрен метод воздействия синусоидальным затухающим переменным напряжением (DAC) при проведении контролируемых испытаний силовых кабелей с учетом всего комплекса поставленных задач. Кроме того, представлены практические примеры.

МЕТОД ВОЗДЕЙСТВИЯ ЗАТУХАЮЩИМ ПЕРЕМЕННЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ НА МЕСТЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Испытание с помощью систем DAC проводится либо как простое испытание на электрическую прочность, либо дополняется определением частичных разрядов (PD) и измерением коэффициента потерь (DF). В результате этого воздействие затухающим переменным напряжением для испытания силовых кабелей отвечает требованиям международных стандартов.

Международный опрос показал, что в большинстве случаев испытаний на электрическую прочность с помощью систем DAC также проводились диагностические измерения (например частичных разрядов и диэлектрических потерь). Для испытания на электрическую прочность применяется заданное количество воздействий затухающим переменным напряжением — см. рис. 3a-3b. Учитывая меньшую длительность воздействия и затухающие характеристики напряжения, получаемые в результате испытания затухающим переменным напряжением, показатели могут отличаться от показателей, полученных при испытании с непрерывным воздействием переменным напряжением.

ИСПЫТАНИЯ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЗАТУХАЮЩЕГО ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Испытания на электрическую прочность можно разделить на два типа:

– неконтролируемое испытание с поддержанием затухающего переменного напряжения с серией воздей-

СХЕМАТИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ОДНОГО ЦИКЛА ВОЗДЕЙСТВИЯ (DAC). МАКСИМАЛЬНЫЙ УРОВЕНЬ НАПРЯЖЕНИЯ DAC ОПРЕДЕЛЯЕТСЯ ПО ПИКОВЫМ ЗНАЧЕНИЯМ НАПРЯЖЕНИЯ (B_{DAC}) И СООТВЕТСТВУЮЩИМ ЗНАЧЕНИЯМ ДЕЙСТВУЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ ($B_{DAC}/\sqrt{2}$) 1-ГО ЦИКЛА DAC [7]

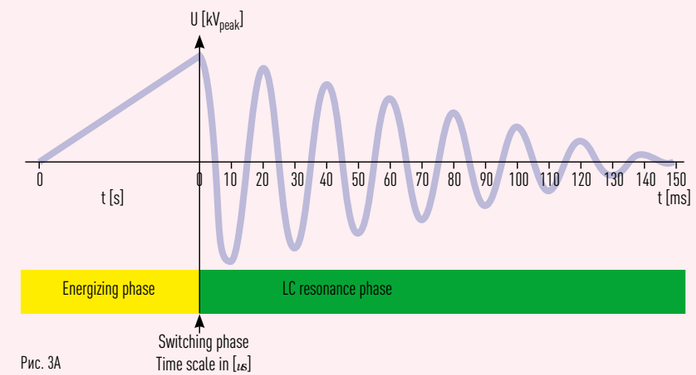


Рис. 3A

СХЕМАТИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РАБОТЫ СИСТЕМ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЗАТУХАЮЩИМ ПЕРЕМЕННЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА МЕСТЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ И ПРИ ОБНАРУЖЕНИИ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ В СИЛОВЫХ КАБЕЛЯХ [7]

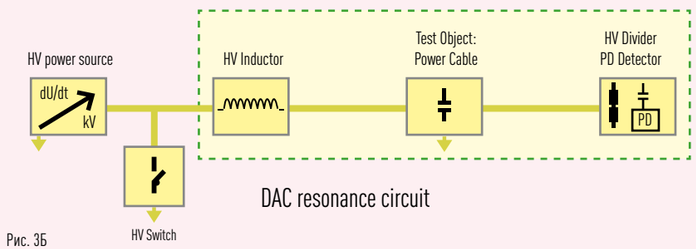


Рис. 3Б

ВЕЛИЧИНЫ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ DAC (20...500 ГЦ) ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СИСТЕМЫ DAC (50 ВОЗДЕЙСТВИЙ С ПОМОЩЬЮ СИСТЕМЫ DAC) НА ТОЛЬКО ЧТО СМОНТИРОВАННЫХ СИЛОВЫХ КАБЕЛЯХ [МЭК 60502, МЭК 60840, МЭК 62067]

Номинальное напряжение силового кабеля [кВ], между фазами	Uo [кВ]	Величина испытательного напряжения DAC VT [кВ, пиковое]
3	3	6
6	4	12
10	6	17
15	9	26
20	12	34
25	15	43
30	18	51
35	21	60
45–47	26	74
60–69	35	99
110–115	64	181
132–138	77	187
150–161	87	212
220–230	127	254
275–287	159	296
500	290	406

Таблица 1

ствий и регистрацией способности поддержания максимального затухающего переменного напряжения (т. е. без возникновения пробоев). Цель простого испытания с воздействием затухающим переменным напряжением — вызвать отказы в проблемных местах кабельной изоляции под воздействием такого напряжения (при минимальном токе повреждения) в то время, когда такой отказ еще некритичен (для системы или потребителей) и когда ремонт можно выполнить с минимальными затратами. При отказе во время испытания повреждение должно быть найдено и исправлено с повторным испытанием цепи. Данные испытания дают положительный либо отрицательный результат;

– контролируемое испытание с несколькими циклами воздействия затухающим переменным напряжением и измерением одного или нескольких дополнительных показателей, которые используются для определения исправности кабеля по результатам такого испытания. Эти дополнительные показатели определяются при расширенной диагностике, например, при обнаружении частичных разрядов. Изменение измеряемых свойств во времени можно использовать для контроля за тем, как испытание воздействует на кабельную систему во время подачи повышенного напряжения.

Благодаря дополнительным данным, получаемым при обнаружении частичных разрядов, контроль свойств изоляции во время испытания на электрическую прочность системой DAC и воздействия испытательного напряжения позволяют получить более точные данные о состоянии изоляции.

При любых типах испытаний величины напряжения и количество воздействий затухающим переменным напряжением должны соответствовать цели таких испытаний. Если принимать во внимание состояние и надежность силовых кабельных систем с экранированием, для полевых испытаний и анализа результатов важны два аспекта:

– проверочные параметры в системе DAC, такие как максимальные значения испытательного напряжения (см. таблицу 1) и данные длительности подачи повышенного напряжения, должны выбираться так, чтобы не допустить сокращения срока службы в результате таких полевых испытаний или свести изменение к минимуму. В случае с испытаниями на электрическую прочность воздействие на неисправную изоляцию должно быть достаточно сильным, чтобы вызвать пробой, либо оно должно превышать критический уровень контролируемого свойства;

– величина напряжения и количество воздействий системой DAC (это влияет на длительность испытания) — важные параметры испытаний, затрагивающих работоспособность кабельной цепи после испытания. Рекомендуемые значения испытательного напряжения и длительность испытаний (приведены в данном документе для испытаний с системой DAC) основаны на публикациях [1], международных рекомендациях и многолетнем опыте полевых испытаний, накопленном различными пользователями технологии DAC. Произвольное повышение напряжения или увеличение длительности испытания по сравнению с рекомендованными значениями может увеличить риск раннего отказа.

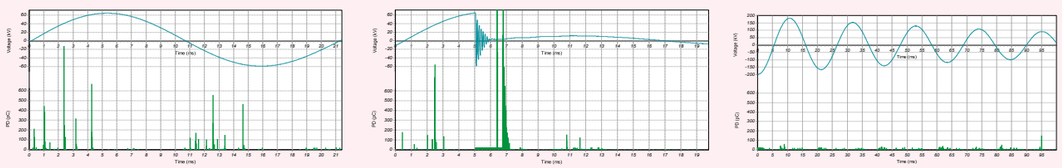
Рис. 4А. Испытание на месте эксплуатации цепи СПЭ-кабеля протяженностью 13,3 км напряжением 220 кВ. Система DAC HV30 подключена к одной из фаз кабельной системы

ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРИМЕРЫ

Воздействие затухающим переменным напряжением для испытания и диагностики силовых кабелей на напряжение до 500 кВ практикуется уже более 12 лет. В этом разделе представлен пример испытаний высоковольтных кабелей и показана важность контролируемых испытаний.

Пример: испытана только что смонтированная сеть подземных СПЭ-кабелей протяженностью 13,3 км на напряжение 220 кВ с использованием DAC с колебательным контуром частотой 49 Гц, воздействие на уровне до 1,3Uo. Было принято решение провести контролируемое испытание на электрическую прочность. По мере повышения испытательного затухающего переменного напряжения, начиная с уровня 0,2Uo, частичные разряды стали наблюдаться в фазе L1. Повышение испытательного напряжения привело к увеличению интенсивности разрядов, а при испытательном напряжении на уровне 0,4Uo

ЗАТУХАЮЩИЕ ПЕРЕМЕННЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ, НАБЛЮДАЕМЫЕ ПРИ КОНТРОЛИРУЕМОМ ИСПЫТАНИИ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ СПЭ-КАБЕЛЯ В ПОДЗЕМНОЙ СЕТИ НА НАПРЯЖЕНИЕ 220 КВ (13,3 КМ)



a) b) c)

Рис. 4Б. a) пример картины частичных разрядов при уровне напряжения 0,2Uo фазы L1; b) пример распределения частичных разрядов при напряжении пробоя на уровне 0,4Uo фазы L1; c) распределение частичных разрядов на уровне 1,3Uo фаз L2 и L3.

возник источник повышенного уровня ЧР в месте разряда. Путем сопоставления участков возникновения частичных разрядов по концентрации таких разрядов на участке длиной 5,3 км удалось найти место возникновения источника повышенного уровня ЧР в кабеле. В результате этого испытание проложенного кабеля воздействием затухающим переменным напряжением доказало свою эффективность как контролируемого метода, примененного для сегмента протяженностью 13,3 км только что проложенного кабеля на напряжение 220 кВ. Вследствие неисправности частичный разряд зафиксирован установкой DAC HV до возникновения пробоя, и благодаря анализу отраженных импульсов (TDR) удалось найти место неисправности с таким разрядом. Остальные две фазы после прокладки соответствуют требованиям и успешно прошли испытание. Измерение было повторено и с другого конца кабеля. Аналогично частичные разряды ЧР были зафиксированы на расстоянии 8 км в том же месте, которое отмечалось с другой стороны (13,3 – 8 = 5,3 км).

ВЫВОДЫ

Основываясь на вышеприведенных результатах, можно сделать следующие выводы:

- с появлением новейших разработок в этой области контролируемые испытания на электрическую прочность находят всё большее применение. Измерение частичных разрядов позволяет выявлять и находить нарушения в изоляции и арматуре силовых кабелей;
- для испытания силовых кабелей как среднего, так высокого напряжения затухающее переменное напряжение в сочетании с обнаружением частичных разрядов может использоваться как альтернатива непрерывному воздействию при испытаниях переменным напряжением;
- в отношении пробоев (в сравнении с неконтролируемыми испытаниями непрерывным воздействием повышенным напряжением) при неоднородной картине неисправностей (возникновение частичных разрядов) контролируемые испытания воздействием затухающим переменным напряжением представляют собой менее разрушительный и более точный метод выявления неисправностей в изоляции и арматуре кабелей, сопровождающихся частичными разрядами;
- воздействие затухающим переменным напряжением применимо в испытаниях после прокладки новых кабелей, эксплуатационных испытаниях отремонтированных кабелей, а также при диагностике и оценке состояния кабелей, изношенных в процессе эксплуатации;
- применение испытания путем воздействия затухающего переменного напряжения в сочетании со стандартными измерениями частичных разрядов позволяет определить характер и распределение частичных разрядов, дополнительно проанализировать импульсы частичных разрядов (TDR) для обнаружения отдельных и множественных участков с частичными разрядами и определить коэффициент диэлектрических потерь.

МЕСТА ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЧР — ДАННЫЕ DAC ИСПЫТАНИЯ КАБЕЛЯ, ПРОТЯЖЕННОСТЬЮ 13,3 КМ, НАПРЯЖЕНИЕМ 220 КВ, ПРИ 1,3U_0. КОНЦЕНТРАЦИЯ ЧР УКАЗЫВАЕТ НА ИСТОЧНИК НА 5,2 КМ (СЛЕВА). ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ПОДТВЕРДИЛО ИСТОЧНИК ЧР НА 8,1 КМ С ДРУГОЙ СТОРОНЫ (СПРАВА)

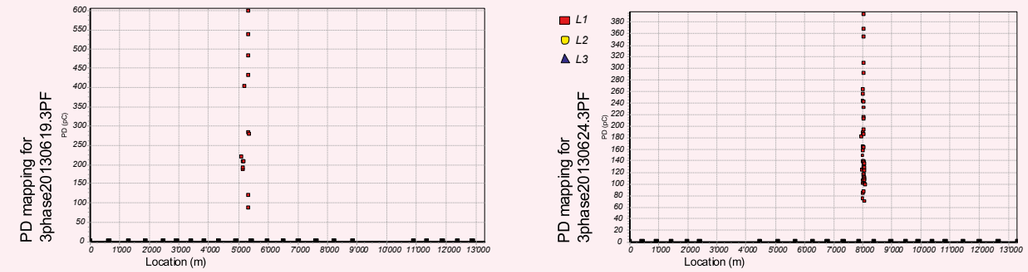


Рис. 5

ЛИТЕРАТУРА

1. Aucourt C., Boone W., Kalkner W., Naybour R.D., Ombello, F., Recommendations for a New After-Laying Test Method for High Voltage Extruded Cable Systems, CIGRE Paper No. 21-105, August, 1990.
2. Seitz P.P., Quak B., Gulski E., Smit J.J., Cichecki P., de Vries P., Petzold F., Novel Method for On-site Testing and Diagnosis of Transmission Cables up to 250kV, Proceedings JiCable '07, 7th Intern. Conf. Insulated Power Cables, Versailles, France, Paper 16, 2007.
3. Gulski E., Cichecki P., Groot E.R.S., Smit J.J., de Vries F., Slangen J., Groot E.R.S., Pellis J., van Houwelingen D., Hermans T.J.W.H., Wegbrands B., Lamballais L., Conditon Assessment of Service Aged HV Power Cables, CIGRE, Paper D1-206, 2008.
4. Gulski E., Cichecki P., Wester F.J., Smit J.J., Bodega R., Hermans T.J.W.H., Seitz P.P., Quak B., de Vries F., On-site testing and PD diagnosis of high voltage power cables, IEEE transactions on dielectrics and electrical insulation, 2008.
5. Gulski E., Cichecki P., Jiankang Z., Rong X., Jongen R., Seitz P.P., Porsche A., Huang L., Practical aspects of on-site testing and diagnosis of transmission power cables in China, CMD2010.
6. CIGRE Technical Brochure 502, On-site testing and PD measurements.
7. Gulski E., Patterson R., Importance of On-site Testing and Diagnosis of Power Cables, NETA PowerTest 2011 Conference, Washington DC, USA.
8. Rakowska A., Noske S., Siodła K., Partial Discharge Measurements as a Data Source Supporting Power Cable Network Management, Proceedings, International Conference CIRED 2009, Prague, Czech Republic, 8-11.06.2009, paper 492.
9. Gulski, E , Cichecki, P , Smit, J.J., Vries, F de , Pellis, J., Houwelingen, D van, Wester F., Bodega R (EWI Ch. High-Voltage Technology) & Hermans, TJWH, Condition assessment of transmission power cables. CIGRE 2011, Paris.
10. Jongen R., Seitz P.P., Quak B., Vries F. de, Cichecki P., New Generation of On-site Testing Technology for Transmission Power Cables, paper A.8.3, 8th Jicable 2011.
11. IEEE 400: Guide for Field Testing and Evaluation of the Insulation of Shielded Power Cable Systems Rated 5 kV and Above.
12. IEEE 400.4: Guide for Field-Testing of Shielded Power Cable Systems Rated 5 kV and Above with Damped Alternating Current Voltage (DAC) (draft under preparation).
13. HD 632 S2 (CENELEC): Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 36kV (Um=42kV) up to 150kV (Um=170kV)
14. IEC 60840: Power cables with extruded insulation and the accessories for rated voltages above 30kV up to 150kV — Test methods and requirements.
15. IEC 62067: Power cables with extruded insulation and the accessories for rated voltages above 150kV up to 500 kV — Test methods and requirements.