

Avaliação do Desempenho em Campo de Isoladores em Polietileno Tipo Pino em Dedes de Cabos nus de 15 kV

A. M. Formiga, CELPE, A. F. Santos, CELPE, P. C. Inone LACTEC, M. Munaro LACTEC, R. J. Ferracin LACTEC, V. S. Filho LACTEC.

Resumo- Este trabalho apresenta o desenvolvimento de metodologias para estudo do processo de envelhecimento em campo de isoladores poliméricos em polietileno utilizados em redes de distribuição de energia com cabos nus. Os isoladores do tipo pino moldados em polietileno (PEAD), têm com uma das qualidades apresentadas sua excelente hidrofobicidade quando ainda novos, conferindo-lhes superior performance em ambientes de alta poluição e umidade. Outras qualidades incluem: baixo peso, grande resistência ao vandalismo e elevada razão resistência mecânica/peso. Entretanto, os isoladores poliméricos apresentam desvantagens como suscetibilidade à degradação e ao trilhamento/erosão; tem durabilidade difícil de ser avaliada; sua confiabilidade em longo prazo é desconhecida e apresentam falhas difíceis de se localizar. Apresentamos os resultados de ensaios de stress cracking efetuados em isoladores de polietileno de diferentes procedências. Os ensaios foram realizados em corpos-de-prova na forma de placas e também em isoladores inteiros. Os resultados de ensaios obtidos com corpos-de-prova na forma de placas são corroborados pelos resultados obtidos nos ensaios efetuados em isoladores inteiros.

Palavras-chave—Distribuição de Energia, Degradação, Envelhecimento, Isoladores Poliméricos, Microscopia Eletrônica de Varredura.

I. INTRODUÇÃO

A utilização de isoladores poliméricos em linhas de transmissão e redes de distribuição vem crescendo continuamente em virtude das vantagens que apresentam com relação aos tradicionais isoladores de porcelana e vidro. Em 1999 nos Estados Unidos, os isoladores poliméricos representavam cerca de 60 a 70% dentre os novos isoladores instalados naquele país [1]. Nas últimas décadas grande quanti-

dade de estudos, pesquisas e desenvolvimentos foram produzidos em torno do tema isoladores poliméricos. Dentro deste tema, podem ser encontrados na literatura trabalhos sobre isoladores de epóxi, isoladores compósitos e isoladores híbridos [2-13]. Os isoladores de epóxi foram os primeiros isoladores poliméricos a serem introduzidos no mercado, sendo até hoje utilizados. Posteriormente, foram desenvolvidos os isoladores compósitos, que são constituídos por um núcleo de resina reforçada com fibra de vidro, recoberto com material elastomérico, geralmente silicone ou EPDM. Recentemente foram introduzidos os isoladores híbridos, que possuem um núcleo de porcelana recoberto com elastômero de silicone.

Com relação aos isoladores de polietileno, tem-se notado até o presente momento na literatura, a ausência de trabalhos descrevendo, com base científica, o seu comportamento em campo e em laboratório. Os isoladores de polietileno são normalmente utilizados em redes compactas, onde existe a necessidade de se estabelecer compatibilidade dielétrica com a cobertura isolante polimérica dos cabos condutores. A utilização de isoladores de polietileno em redes de cabos nus surge como uma experiência pioneira, visando a redução de custos para a concessionária, tendo em vista o seu menor custo frente aos isoladores cerâmicos. O estudo do comportamento do material polimérico utilizado na composição dos isoladores é de fundamental importância para avaliar a vida útil destes produtos.

II. LOCAIS DE COLETA E DESCRIÇÃO DOS ISOLADORES ESTUDADOS

A primeira etapa do projeto consistiu na escolha das localidades com diferentes condições ambientais, onde seriam efetuados os estudos de envelhecimento natural dos isoladores de polietileno. Amostras de isoladores de polietileno envelhecidos pelo período de 2 anos aproximadamente foram retiradas destes locais e submetidas à avaliação em laboratório. Os isoladores retirados foram substituídos por isoladores novos idênticos.

Foram definidas três regiões que, por suas características, deveriam provocar solicitações de diferentes naturezas sobre os isoladores:

Litoral

A. M. Formiga trabalha na Companhia Energética de Pernambuco em Planejamento da Transmissão (e-mail: aldofomirga@celpe.com.br).

A. F. Santos trabalha na Companhia Energética de Pernambuco em Planejamento da Transmissão (e-mail: aldenisa@celpe.com.br).

P. C. Inone trabalha no Instituto de tecnologia para o desenvolvimento na área de energia elétrica (e-mail: inone@lactec.org.br).

M. Munaro trabalha no Instituto de tecnologia para o desenvolvimento na área de energia elétrica.

R. J. Ferracin trabalha no Instituto de tecnologia para o desenvolvimento na área de energia elétrica.

V. S. Filho trabalha no Instituto de tecnologia para o desenvolvimento na área de energia elétrica.

Faixa litorânea do município de Olinda no estado de Pernambuco e, adicionalmente, faixa litorânea de Natal, no estado do Rio Grande do Norte. Esta última localidade, embora situada em outro estado, também foi abrangida neste projeto, tendo em vista que são similares em termos de agressividade ambiental, e onde também estão instalados isoladores de polietileno em redes de cabo nu.

Região da Zona da Mata

Esta região foi escolhida pelo fato de ter clima úmido. As amostras foram retiradas de localidades abrangidas pela Seccional de Cabo de Santo Agostinho.

Região do Sertão

Esta região tem como característica, clima semi-árido. As amostras foram retiradas de localidades abrangidas pela Seccional de Serra Talhada.

III. EXPERIMENTAL

Os isoladores retirados da rede elétrica da CELPE e COSERN foram submetidos a diversas análises, de acordo com a seqüência descrita a seguir. O objetivo foi efetuar uma avaliação do nível de degradação dos mesmos, comparativamente aos corpos-de-prova novos.

A. Inspeção Visual

Os isoladores foram inicialmente submetidos a análise por inspeção visual com o objetivo de efetuar uma avaliação preliminar do nível de degradação dos mesmos, comparativamente aos corpos-de-prova novos, e de localizar eventuais trincas e físsuras produzidas no corpo da amostra durante o período de uso.

Foi verificada a ocorrência de alterações resultantes do envelhecimento, visíveis a olho nu, como perda de brilho, aparecimento de manchas, mudanças de tonalidade e esfaleamento superficial.

B. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Análise por MEV foi efetuada a fim de se efetuar uma análise mais precisa das condições superficiais das amostras. Paralelepípedos, com dimensões aproximadas de 8x8x3 mm, foram cortados da superfície da saia superior dos isoladores, colados em suportes apropriados e posteriormente recobertos com uma fina camada de ouro. Amostras assim preparadas da superfície dos isoladores foram examinadas com um microscópio eletrônico de varredura Philips, modelo XL30.

C. Medidas de Correntes de Fuga

A corrente de fuga de um isolador é considerado um bom indicativo de suas condições superficiais e do grau de severidade da poluição local. Neste sentido, efetuaram-se medidas de corrente de fuga nas amostras envelhecidas, a fim de avaliar o seu nível de degradação.

A câmara de névoa que foi utilizada nas medidas de corrente de fuga é lacrada, e foi confeccionada com chapas de acrílico e cantoneiras de aço galvanizado, apresentando volume interno de aproximadamente 10 m³.

Um bico pulverizador, instalado no teto, produz uma fina névoa que preenche uniformemente o interior da câmara. Água deionizada ou água salgada, a vazão de 4 litros/hora, é pulverizada pela passagem forçada de uma corrente de ar comprimido sob pressão de 4 bar, através do bico pulverizador.

Um transformador de distribuição de 25 kV/440-220 V, 10 kVA, ligado de maneira reversa, é utilizado como fonte de tensão. A tensão de saída pode ser variada pela regulagem da tensão fornecida ao transformador, por meio de um variac.

Os isoladores foram pendurados no interior da câmara por um fio de nylon, que por sua vez é preso a um isolador de silicone fixado na vertical. A energização foi feita através de um fio de cobre rígido, enrolado duas vezes em torno do pescoço do isolador. O aterramento foi efetuado através de um fio de cobre fixado no pino do isolador.

A Figura 1 mostra o arranjo que foi montado para efetuar as medidas de corrente de fuga. Por meio da medida de queda de tensão no shunt, obtém-se a corrente RMS que passa pelo isolador. Um centelhador é acoplado em paralelo com o shunt, para proteção contra tensões acima de 90 V. O sinal de saída é conduzido através de um cabo coaxial até o multímetro. As leituras efetuadas são armazenadas, por intermédio de uma saída RS 232, em um microcomputador, à taxa de 1 leitura por segundo.

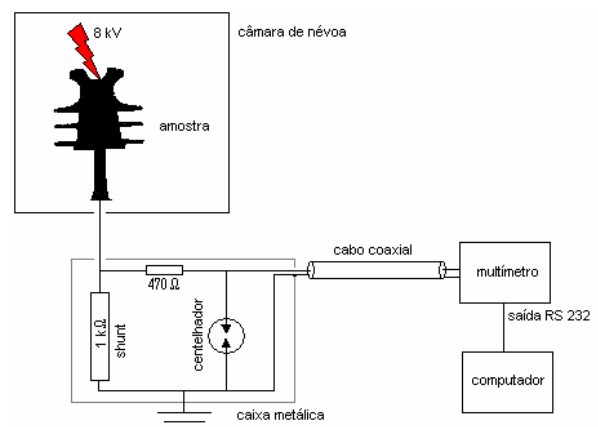


Figura 1 – Arranjo utilizado nas medidas de corrente de fuga.

D. Radiografia Industrial

Através da radiografia industrial é possível visualizar, de maneira não destrutiva, defeitos internos na forma de vazios e bolhas de ar, que podem se originar durante o processo de moldagem por injeção dos isoladores, como resultado do preenchimento irregular do molde.

Através da radiografia industrial também é possível observar com mais detalhes, trincas e físsuras presentes nos isoladores. Trincas e físsuras podem surgir como consequência de solicitações mecânicas mais intensas ou devido à

ação do calor e fluidos agressivos.

E. Análise das Descargas Parciais

Para um melhor entendimento dos princípios de detecção, medida e análise das descargas parciais, uma representação esquemática do arranjo experimental é apresentada na Figura 2.

A fonte de tensão alternada, que alimenta o circuito, é constituída por um gerador de tensão senoidal e um transformador elevador de tensão Osaki Electric Ltd.[®] tipo EM10C, o qual apresenta alta impedância para pulsos de descargas parciais. Para que o pulso de corrente devido à descarga parcial possa se propagar e ser detectado na impedância de medição (Z), um capacitor de acoplamento (K) é colocado em paralelo com a capacitância (a) da amostra, i.e., do isolador.

O circuito série formado por K , a , e Z constitui um caminho de baixa impedância para o pulso de descarga. O pulso desenvolvido na impedância de medição Z é amplificado pelo amplificador A e observado no osciloscópio O . Paralelamente à observação visual feita através do osciloscópio, são coletados e medidos os pulsos de descarga através de um analisador de descargas parciais com resolução em ângulo de fase (PRPDA). O analisador, bem como o programa para coleta e armazenamento dos dados referentes à ocorrência das descargas parciais, foi desenvolvido no LACTEC.

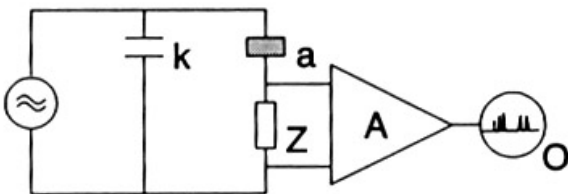


Figura 2 - Representação esquemática do arranjo experimental.

O analisador mede e analisa as distribuições estatísticas das ocorrências das descargas em função da amplitude e do ângulo de fase de ocorrência das descargas parciais. Cada descarga parcial é registrada com sua amplitude e ângulo de fase em relação à tensão aplicada na amostra. A partir do conjunto de dados acumulados durante o período de medição, o qual corresponde a um número inteiro de períodos da tensão aplicada, duas distribuições são obtidas, a saber: distribuição do número de ocorrências em função do ângulo de fase [$H_n(\phi)$] e distribuição do número de ocorrências em função da amplitude ou carga aparente [$H_n(q)$].

As distribuições $H_n(q)$ e $H_n(\phi)$ têm sido aplicadas com sucesso tanto para reconhecimento de defeitos geradores de descargas parciais e/ou diagnóstico de envelhecimento de sistemas de isolamento, quanto para monitoramento em linha da evolução das descargas parciais em sistemas de isolamento de grandes geradores, transformadores, sistemas isolados a gás e cabos de potência.

F. Ensaio de Tensão Aplicada

Alguns isoladores provenientes do campo foram submetidos ao ensaio de tensão alternada de 60 Hz, a seco. A Figura 3 mostra um diagrama descrevendo a montagem utilizada no ensaio. Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** é mostrado uma vista geral da montagem dos corpos-de-prova (a), e detalhes da amarração utilizada (b e c). A amarração utilizada em todos os casos foi a de topo. Em apenas umas das amostras o ensaio foi repetido, utilizando-se a amarração lateral.

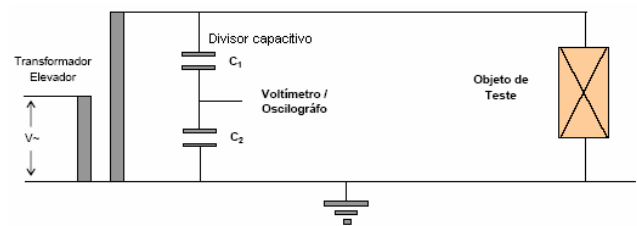


Figura 3 – Diagrama da montagem utilizada no ensaio de tensão aplicada.

G. Análise Dinâmico – Mecânica (DMA)

No ensaio dinâmico-mecânico mede-se a resposta (deformação) de um material submetido a uma solitação mecânica de natureza cíclica, normalmente senoidal. Como a tensão mecânica aplicada e a deformação resultante geralmente estão defasadas uma da outra, duas grandezas podem ser definidas:

Módulo de elasticidade (E'). Representa a parcela reversível da deformação, isto é, a deformação que é integralmente recuperada após a tensão ser removida.

Módulo de perda (E''). Representa a parcela irreversível da deformação. Decorre da dissipação de energia mecânica sob a forma de calor.

O ensaio DMA permite, através do módulo de elasticidade, que se tenha uma idéia da rigidez mecânica de um material. O ensaio permite também, através do módulo de perda, a determinação de transições térmicas, uma vez que a dissipação de energia mecânica é máxima durante estas transições.

No presente estudo, efetuou-se análise DMA em três amostras de isoladores. Os corpos-de-prova utilizados nos ensaios consistiram em filmes com 100 μm de espessura, cortados na forma de retângulos com aproximadamente 20x3 mm. Os filmes foram obtidos por microtomia de pedaços de isoladores.

H. Ensaio de Multiestressamento

O ensaio de multiestressamento aqui proposto consiste em uma adaptação do ensaio de compatibilidade dielétrica que é efetuado em material da rede compacta. Originalmente, o ensaio consiste na montagem dos acessórios, que incluem cabos cobertos, espaçadores, isoladores, laços de amar-

ração e anéis de amarração. O sistema montado é submetido à tensão elétrica, ciclos de aspersão com solução salina e aplicação de correntes elevadas ao condutor, para provocar sobre-aquecimento.

IV. RESULTADOS

A. Inspeção Visual

Os principais sinais de degradação observados na maioria das amostras foram o de erosão nas saias, tanto na face superior quanto na face inferior. Esta erosão varia de intensidade de uma amostra à outra; entretanto observa-se que a erosão é mais agressiva em isoladores que ficaram um maior tempo em exposição. Não foram observadas diferenças, com relação à presença de marcas de erosão, entre o lado do isolador voltado para o mar e o lado voltado para o continente.

B. Microscopia Eletrônica de Varredura

Nas fotomicrografias da superfície das amostras obtidas com ampliação original de 1000x, foi detectada a presença de regiões esburacadas, intercaladas com regiões lisas, que indica o início de degradação. Os sulcos que foram observados são marcas produzidas pelo atrito da superfície durante a manipulação do isolador.

C. Medidas de Corrente de Fuga

Todas as amostras apresentaram correntes de fuga bastante baixas, da ordem de 0,02 a 0,05 mA. As pequenas diferenças nos níveis de corrente de fuga observadas para as diferentes amostras se devem a diferenças de umidificação superficial. Uma inspeção visual realizada imediatamente após os testes, revelou que as superfícies dos isoladores eram essencialmente hidrofóbicas, uma vez que a névoa condensada sobre as mesmas, formava gotas discretas, ao invés de molhá-las.

D. Radiografia Industrial

Foram observados defeitos em apenas seis dos isoladores analisados. Os resultados estão descritos a seguir na Tabela 1.

Amostra	Defeito
Litoral CELPE	Sem defeito
Zona da Mata	Sem defeito
Sertão	Sem defeito

Litoral COSERN	1	2 bolhas, trinca
	2	2 bolhas, trinca
	3	2 bolhas
	4	2 bolhas
	5	1 bolhas
	6	1 bolha

Tabela 1- Resultados de tomografia industrial realizada nos isoladores.

E. Análise das Descargas Parciais

Três isoladores foram submetidos ao teste de descargas parciais, sendo um isolador novo (isolador TME) e dois isoladores envelhecidos por cerca de dois anos em campo. Os dois isoladores envelhecidos, como COSERN-2 e COSERN-4, além de apresentarem degradação superficial em grau avançado, apresentam defeitos internos, que foram detectados através de radiografia industrial.

Outras amostras envelhecidas não foram testadas, uma vez que aquelas descritas acima constituem os exemplos mais severos de degradação observados, conjugando defeitos internos com degradação superficial.

A fixação dos isoladores aos cabos foi efetuada utilizando-se de três configurações distintas: i) sem amarração (SA); ii) com anel de amarração polimérico (AP) e iii) com amarração metálica (AM). Nas configurações SA e AP que foram utilizadas, tanto o isolador novo quanto os isoladores envelhecidos não apresentaram ocorrência de descargas parciais quando submetidos à tensão fase-terra de 8 e 12 kV. Por outro lado, quando a configuração AM foi utilizada, verificou-se a ocorrência de descargas parciais, tanto para o isolador novo quanto para os isoladores envelhecidos.

Duas observações importantes podem ser feitas a partir dos resultados obtidos. A primeira é que nos testes efetuados com as configurações SA e AP, não foram observadas descargas nos isoladores poliméricos contendo defeitos internos. Com base nestes resultados, pode-se dizer que, quando sob tensão usual de operação (8 kV fase-terra), descargas *internas* não são ativadas no interior dos defeitos. Este fato foi confirmado posteriormente através de cortes transversais efetuados na região do pescoço de isoladores envelhecidos que continham bolhas. Através de cortes sucessivos, foi possível ter acesso às superfícies das bolhas, sendo constatado que não havia sinais de degradação provocado por descargas parciais. Sendo assim, os possíveis ativadores de descargas *internas* em isoladores poliméricos seriam as sobretensões. Apesar disso, isoladores com defeitos não deveriam ser utilizados pois as descargas internas, uma vez ativadas, poderiam provocar ruptura dielétrica através do corpo do isolador.

Além disto, a configuração AM não seria a mais indicada para ser utilizada em campo porque consiste em fonte potencial de descargas parciais, indistintamente se o isolador for novo ou envelhecido. Como consequência, poderá haver a degradação do material polimérico através de subprodutos gerados por corona, trilhamento e erosão causados pelas descargas superficiais. O resultado destes efeitos deletérios é, em última instância, a ruptura do isolador.

F. Ensaio de Tensão Aplicada

Em todos os casos houve descarga disruptiva externa, mas nenhuma das amostras sofreu perfuração. A amostra COSERN-2, que apresentava uma trinca na região do pescoço comunicando o interior com o exterior, também não sofreu descarga disruptiva interna, mesmo quando o ensaio foi repetido utilizando-se amarração lateral. Possivelmente, como a tensão foi aplicada por curtos períodos de tempo até a ruptura, não houve tempo para ocorrer descarga pela trinca. Uma outra explicação possível é que a trinca seria muito estreita e estaria preenchida com óleo de linhaça, exsudada da massa de vidraceiro, que é utilizada como preenchimento entre a cabeça do pino e o corpo do isolador.

G. Análise Dinâmico – Mecânica (DMA)

As amostras apresentaram módulos de elasticidade similares em toda a faixa de temperaturas, indicando que não há diferenças significativas de rigidez mecânica.

H. Ensaio de Multiestressamento

Os isoladores foram submetidos ao ensaio de multiestressamento pelo período de 66 dias, já descontados os períodos em que houve interrupções temporárias. Durante o ensaio, os corpos-de-prova foram submetidos ininterruptamente à tensão fase-terra de 11,5 kV. Corrente elétrica de magnitude suficiente para elevar a temperatura dos cabos nus até aproximadamente 40-45°C foi aplicada ininterruptamente.

Durante o ensaio, descargas superficiais não visíveis podiam ser percebidas graças ao forte cheiro de ozônio despreendido e ao zumbido produzido. Imagens dos corpos-de-prova registradas com um termovisor, durante o ensaio, revelaram pequeno aquecimento nas regiões entre saias, onde a densidade de corrente era maior.

A ausência de descargas visíveis durante o ensaio indica que o desempenho dos isoladores não ficou seriamente comprometido pela ocorrência das erosões superficiais localizadas.

V. CONCLUSÃO

Os resultados indicam a ocorrência de degradação branda no interior dos materiais, mas que não comprometem, até o momento, o seu desempenho.

Sob condições normais de operação, bolhas presentes no interior dos isoladores parecem não prejudicar o seu desempenho. Isoladores da Pirelli e da PLP apresentam problemas de degradação superficial por radiação UV, que pode prejudicar seu desempenho em ambientes marítimos e em ambientes poluídos.

- [1] R. Hackam, "Outdoor HV Composite Polymeric Insulators", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol.6, pp.557-585 (1999).
- [2] Matsuoka, K. Naito, T. Irie and K. Kondo, "Evaluation Methods of Polymer Insulators Under Contaminated Conditions", IEEE/PES. T&D. Asia Pacific, 2002.
- [3] W. Shaowu, L. Xidong and H. Lengceng, "Laboratory Study on Hydrophobicity and Pollution Flashover Properties of Polymer Insulators", IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 1999.
- [4] K. Naito, K. Izumi, K. Takusu and R. Matsuoka. "Performance of Composite Insulators Under Polluted Conditions", CIGRE 33-301, p. 1-8, 1996.
- [5] M. Ishiwari, S. Ito, K. Arakawa, T. Nakachi and K. Kondo, "Various Artificial Contamination Withstand Voltage Test Methods and a Comparison of Their Results on Polymer and Porcelain Insulators", High Voltage Engineering Symposium, August 22-27, 1999.
- [6] W. Usui, N. Kasuya, H. Osaka, S. Ito, H. Kurebayashi and R. Matsuoka, "Withstand Voltage Characteristics on Contaminated Polymer Insulators Under Rain Conditions", Proceedings of The 6th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Xi'an Jiantong University, Xi'an, China, June 21-26, 2000.
- [7] M. P. Delgado, "Programs to Improve the Reliability of Meralco's Distribution Network by Assessing Performance of Alternate Insulator and Arrester Technologies", Insulator News & Market Report, vol. 8, pp.24-30 (2000).
- [8] A. E. Vlastós, "Influence of Material and Electrical Stress on the Performance of Polymeric Insulators", Proceedings of the 4th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Brisbane, Australia, June 3-8, 1994.
- [9] T. Sörqvist and A. Vlastós, "Hydrophobicity and Leakage Current Statistics of Polymeric Insulators Long-Term Exposed to Coastal Contamination", Conference Record of the 1996 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Montreal, Quebec, Canada, June 16-19, 1996.
- [10] T. Sörqvist, S. M. Gubanski and A. E. Vlastós, "Field Experience With Non-Ceramic Hollow-Core Insulators", High Voltage Engineering Symposium, August 22-27, 1999.
- [11] M. M. Awad, O. Elgendy, B. A. Arafa and A. Nosseir, "The Effect of Industrial Environmental Conditions on the Performance of Conventional and Polymeric Insulators", High Voltage Engineering Symposium, August 22-27, 1999.
- [12] N. Yoshimura & S. Kumagai & S. Nishimura, "Electrical and Environmental Aging of Silicone Rubber Used in Outdoor Insulation", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol.6, pp.632-650 (1999).
- [13] P. D. Blackmore et al., "Condition Assessment of EPDM Composite Insulators using FTIR Spectroscopy", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol.5, pp.132-141 (1998).