

發電機 固定子 捲線의 絕緣熱化 診斷技法 및 判定基準 設定에 關한 研究

韓電電力研究院

책임연구원 주영호

1. 序 論

대형 發電機 固定子 捲線의 예기치 않은 절연 파괴 사고는 불시의 운전정지로 인한 電力 공급의 불안과 장기간의 복구시간에 따른 經濟的 손실을 초래하기 때문에 고정자 권선의 정확한 절연상태, 더 나아가 사용 가능한 殘存수명을 예측하기 위한 研究가 미국, 일본 등 선진국을 중심으로 활발히 진행되어 왔다.

더욱이 국내의 발전기는 지난 '70년대 급격한 경제 발전으로 인한 전력수요의 증가에 대처하기 위하여 설비 용량이 대폭 증가되었다. 이러한 發電機의 장기간 사용으로 인하여 老朽化되어 설계 수명의 한계에 와 있거나 초과되어 운전되고 있고, 부지확보 및 경제적 현실을 감안할 때 신규 발전소의 건설이 어려운 상태이기 때문에 발전기 維持 補修의 信賴性 확보, 效率的인 운용계획 수립과 함께 補修, 再捲線, 교체 등의 경제적인 豫防整備 및 사용 수명의 연장을 위해서, 고정자 권선의 絕緣 熱化 상태를 信賴性 있게 예측할 수 있는 진단 기법 및 판정 기준의 確立이 절실히 요구되고 있다.

본 論文에서는 발전기 고정자 권선의 정확한 絕

緣熱化 진단 기법에 대하여 설명하고, 절연열화 판정기준 설정을 위한 기초 연구로 실제운전에 의해 장기간 열화된 17KV급 Polyester 절연 권선과 (비)파괴 시험결과를 통해서 誘電靜接(Tan δ), 靜電容量(Capacitance), 交流電流(AC Current), 部分放電(Partial Discharge) 시험 등의 각종 비파괴 파라메타와 최대부분방전 크기 및 절연파괴와의 상호 聯關性을 부여한 結果를 제시한다. 또한, 화력발전기 고정자 권선의 절연열화 상태의 평가를 위한 새로운 파라메타로써 部分放電(Partial Discharge) 개시전압(Discharge Inception Voltage ; DIV)에서의 부분방전 크기를 기준으로 전압에 따른 최대 부분방전 크기의 증가율을 나타내는 부분방전 변화 指數(PDI : Partial Discharge Index)를 도입하고 絕緣 破壞 전압과 PDI (Partial Discharge Index)와의 相關關係를 규명함으로써 PDI의 有用性을 증명하고 PDI를 이용한 발전기 고정자 권선의 새로운 열화 판정기준을 제안한다.

2. 絕緣熱化 診斷技法

電氣 絕緣 材料의 상태는 電氣的인 시험에 의하

여 가장 잘 평가된다. 전기기기에 사용되는 절연 계통에 대한 시험들은 크게 두가지 방식이 있다. 첫번째는 고전압 절연내력 시험과 두번째는 절연 저항(Megger)과 유전정접(Tan δ) 시험과 같은 절연물의 특성을 시험하는 시험으로 나누어진다. 첫번째 시험은 가까운 장래에 사고의 위험이 없이 정격전압에서 기기가 사용 가능한가의 여부를 결정하기 위하여 정격 전압보다 높은 AC 혹은 DC 전압을 인가하여 사용 가능/불가능을 판정하는 시험이다. 시험전압은 기기의 종류와 크기에 따라 여러 규격이 정하여져 있다. 이러한 절연 내력시험에서 합격한다는 것은 절연물이 열화가 아직甚하게 진전되지 않아 운전조건에 커다란 변화가 없다면 향후 몇 년 동안은 더 기기를 사용할 수 있다는 것을 의미한다. 그러나 絶緣 耐力시험에 의하여는 절연 상태를 알 수 없다.

다른 전기적인 시험에 의하여는 습도, 오손, 미소공극(Void), 박리, 쪼개짐 등과 같이 절연물을 열화시키는 현상들을 알 수 있다. 이러한 시험들은 AC 혹은 DC 전압을 가하여 측정하며 원하는 특성과 예상되는 損傷의 종류에 따라 다르게 適用된다.

2.1 절연저항 시험(Megger Test)

가. 概要

절연물에 실제로 전압을 인가하였을 때 전류가 전혀 흐르지 않는 이상적인 절연체는 존재하지 않고, 내부 또는 표면을 따라 어느 정도의 전류가 흐른다. 이 인가전압에 대한 전류의 비를 저항단위로 표시하며, 이 저항값을 M Ω [Megger-Ohm]

단위로 표시하여 절연체가 가지는 절연저항(INSulation Resistance)이라 한다. 절연체에 외부로부터 이물질이 부착되거나 흡습 또는 오손되면 절연체에 도전성 경로가 형성되어 절연저항이 낮아지게 된다. 따라서 절연저항 시험에 의해서 절연체의 흡습이나 먼지 축적 등에 의한 오손상태를 어느 정도는 알 수 있다.

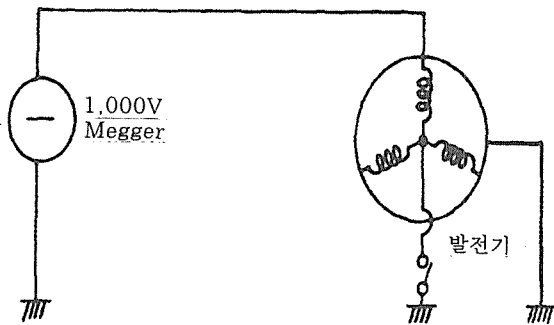
이와 같은 절연저항 측정시험(Megger Test)은 운전 개시전이나 운전중에 필요한 절연저항을 가지고 있는가의 여부, 운전에 따른 절연저항 저하의 정도를 점검하고, 절연열화 진단시험시 사용되는 고전압을 인가해도 충분한가를 확인하기 위해서 실시한다.

나. 試驗 回路

일반적으로 절연저항 시험은 1,000[V] 또는 2,500[V]급 Megger Test 장비에 의해 발전기 고정자 권선을 각상별로 분리하여 상별 절연저항을 측정하며, 회로도(그림 2-1)과 같다.

다. 使用裝備

- 장비명 : 1,000V-2,000M Ω Digital Insulation Tester(1) 또는 5KV Automatic Insulation Tester(2)
- 제작회사 : (1) Yokogawa Electric Works (YEW) Ltd.(일본)
(2) AVO International Co.(영국)
- 모델명 : (1) 2407
(2) Megger Series 1-5,000
- 동작전원 : 내부전원(Battery 사용)



(그림 2-1) 절연저항 측정회로

라. 試驗節次

- (1) 발전기 고정자 권선의 오손된 부분을 충분히 세척 및 건조 시킨다.
- (2) 발전기 각상의 출력측(Line Side) 및 중성점(Neutral Side)을 분리하여 각 상별로 완전히 독립회로가 되도록 한다.
- (3) 시험하지 않는 상과 발전기 외함(Frame)을 접지(ground)시킨 상태에서 한상씩 절연저항을 측정한다.
- (4) 절연저항 측정장비를 사용하여 직류 1,000[V] 또는 2,500[V]의 전압을 인가하여 1분 후의 절연저항치를 MΩ (Megger-ohm) 단위로 직독한다.

마. 結果分析

측정된 절연저항치의 기준치에 대한 大小로서 권선의 절연저항 상태를 판단한다. 미국 EPRI에서 제시한 판정기준에 의하면 인가전압에 관계없이 1,000[V] Megger의 경우, 고정자 권선의 허용 최소 절연저항은 「정격 선간전압 (E)+1」 [MΩ] 이상(즉, 13.8kV급 권선이면 허용 최소 절연

저항이 약 15Ω)이지만, 근래에는 절연재료의 발달로 인해 발전기 고정자 권선의 절연저항 값이 100[MΩ] 이상을 나타내는 것이 일반적이다.

2.2 直流電流 試驗(P.I. Test)

가. 概要

직류전류 시험(성극지수 시험)은 절연물에 직류전압을 인가했을 때의 전류-시간 특성으로 부터 절연물 표면의 흡습, 도전성 불순물의 혼입/생성, 오손과 절연물의 결함 등 절연체의 상태를 판정하는 시험이다.

전류의 크기는 시료의 형태와 크기에 따라 변하기 때문에 전류의 크기만으로 절연상태를 판단할 수는 없다. 절연물의 표면이 오손되거나 흡습되면 누설전류가 증가하고, 따라서 직류 전류-시간 특성곡선에선 누설전류의 상승으로 전류의 감쇠율이 낮아지게 된다.

이러한 특성을 이용하여 전류의 시간변화를 나타내는 지표로서 다음 식과 같은 성극지수(Polarization Index : P.I.)를 사용하여 권선 표면의 흡습과 오손 정도를 판정한다.

성극지수(P.I.)=

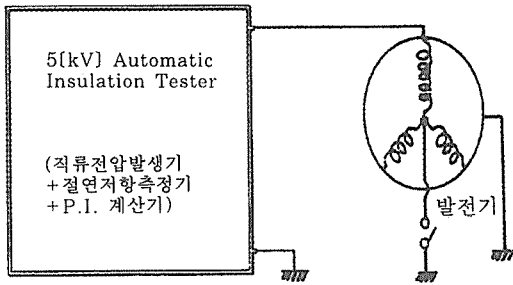
$$\frac{\text{전압인가 1분 후의 전류}(\mu\text{A})}{\text{전압인가 10분 후의 전류}(\mu\text{A})}$$

$$\frac{\text{전압인가 10분 후의 절연저항}(M\Omega)}{\text{전압인가 1분 후의 절연저항}(M\Omega)}$$

나. 試驗 回路

일반적으로 직류전류(P.I.) 시험은 발전기 고정자 권선의 각상별로 절연저항을 측정하여 1분치에

대한 10분치의 전류비(또는 절연저항비)를 구하고, 시험 회로도는 (그림 2-2)와 같다.



(그림 2-2) 직류전류(P.I.) 측정회로

다. 使用裝置

- 장 비 명 : 5kV Automatic Insulation Tester
- 제작회사 : AVO International Co.(영국)
- 모 델 명 : Megger Series 1-5,000
- 동작전원 : 내부전원(Battery 사용)

라. 試驗節次

- (1) 발전기 각상의 출력측(Line Side) 및 중성점(Neutral Side)을 분리하여 각상별로 완전히 독립회로가 되도록 한다.
- (2) 시험하지 않는 상과 발전기 외함(Frame)을 접지(ground)시킨 상태에서 (그림 2-2)와 같이 회로를 구성하여 한상씩 시험을 수행한다.
- (3) 권선과 접지간에 직류(DC), 1,000[V]의 전압을 인가하여 1분, 5분, 10분 경과시의 직류 누설전류 또는 절연저항을 기록하여 성극지수(P.I.)를 계산한다.

마. 結果分析

직류전류 시험에 있어서의 절연상태 판정기준은 성극지수(P.I.)가 2보다 클 때에는 권선상태가 건조하고 깨끗하다고 판정할 수 있으며 P.I. 값이 1에 접근할수록 권선표면에 습기가 많고 오손상태가 심하여 고정자 권선 표면의 절연상태가 불량하다고 할 수 있다.

2.3 交流電流 試驗(AC Current Test)

가. 概要

교류전류 시험은 절연물에 교류전압을 인가했을 때 흐르는 전류와 전압과의 관계, 즉 $I - V$ 특성으로 부터 절연상태를 평가하기 위한 시험이다. 교류전압을 절연물에 인가하면 전압상승에 비례해서 충전전류가 증가하며, 이때 절연층내에 결함(미소공극; void)이 존재하여 부분방전(Partial Discharge; PD) 현상이 발생하게 되면 미소공극을 단락시켜 충전전류가 급격히 증가하게 된다. 이러한 전류 급증전압 및 전류 급증률로 부터 절연물의 흡습 및 열화의 정도, 또는 부분방전 발생 상황 등을 진단할 수 있다.

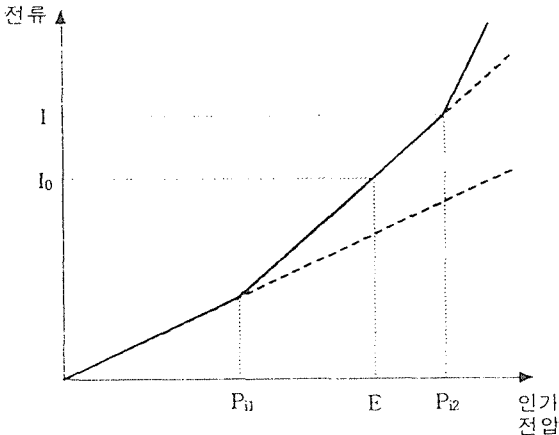
비교적 열화가 진행된 절연물에 교류전압을 인가했을 경우, 인가전압이 높아져 부분방전이 발생하면, 전류는 전압에 비례하지 않고 (그림 2-3)과 같이 급증하게 된다. 이와 같이 전류가 급증하는 점의 전압을 전류급증 전압이라 부르며, 2개의 전류 급증점이 존재하는 경우 낮은 전압점은 제 1 전류 급증점(P_{II})은 미소공극내 방전에 기인하는 것으로서 부분방전 개시전압(Discharge Inception Voltage; DIV)이나 유전정점($\tan \delta$) 증가전압과

비교적 일치하는 경향이 있고, P_{12} 는 미소 공극간의 섬락에 기인하는 것으로서 파괴전압과 상관관계가 있는 것으로 보고되고 있으며, 이로부터 절연파괴(Break Down) 전압(V_{BD})을 산출하기도 한다(발전기 권선의 경우, $V_{BD}=1.7\sim 2.3\times P_{12}$).

교류전류 시험에서의 전류-전압 특성에 있어서 절연진단 시험에 사용되는 파라메타는 다음 식에 따라 정의되는 전류증가율(ΔI)을 사용한다.

$$\Delta I = \frac{I - I_0}{I_0} \times 100 [\%]$$

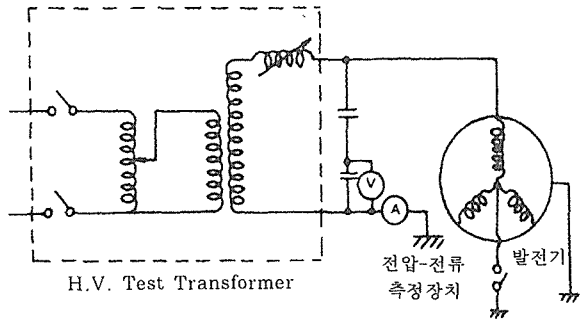
단, I : 정격(단자)전압(E) 인가시 흐르는 전류
 I_0 : 전류가 직선적으로 증가한다고 가정할 경우 정격전압에서의 전류



(그림 2-3) 교류 전류(I)-전압(V)특성

나. 試驗回路

교류전류 시험은 일반적으로 고정자 권선의 각 상별로 발전기 단자와 대지간에 정격 상전압의 1.25배($1.25 \times E \sqrt{3}$ [kV])까지의 교류전압을 인가하여 교류전류의 변화상태(ΔI)를 측정하고, 시험 회로도(그림 2-4)와 같다.



(그림 2-4) 교류전류 시험회로

다. 使用裝備

- 장비명: Automatic 12kV Insulation Test System(Schering Bridge)
 - Capacitance and Dissipation/Power Factor Test Set (1)
 - High Voltage Control Unit (2)
 - High Voltage Supply (3)
 - Resonating Inductor (4)
- 제작회사: Tettex Instruments(스위스)
- 모델명: (1) Type. 2818-QA,
 (2) Type. 5283-CU/UE,
 (3) Type. 2818/5283-QA
 (4) Type. 5283-UO
- 동작전원: AC 220 V, 20A

라. 試驗節次

- (1) 발전기 각상의 출력측(Line Side) 및 중성점(Neutral Side)을 분리하여 각상별로 완전히 독립회로가 되도록 한다.
- (2) 시험하지 않는 상과 발전기 외함(Frame)을 접지(ground)시킨 상태에서 (그림 2-4)와 같이 시험회로를 구성하여 한상씩 시험을 수행한다.

- (3) 고정자 권선이 Slot 부분에서 Guard가 있고, 접지되어 있으므로 측정모드를 GSTg (Grounded Specimen Test with Guarding) - A mode에서 설정하여 측정한다.
- (4) 각 상별로 교류전압을 $1.25 \times E/\sqrt{3}$ [kV] 까지 일정간격으로(1kV씩) 상승시켜 각 Step별로 교류전류 값을 측정하며, 이때 정격전압에서의 전류값으로 추정하여 계산한 ΔI 를 이용하여 교류전류의 변화율을 판단한다.

마. 結果分析

일본에서의 교류전류 시험결과에 대한 판정기준은 정격전압이 11[kV] 이상인 고정자 권선의 경우 $1.25 \times E/\sqrt{3}$ [kV]의 측정전압에서 ΔI 가 5 [%] 미만이면 양호하다고 판정하고 있다.

2.4 誘電靜接 및 靜電容量 試驗(Tan δ & Capacitance Test)

가. 概要

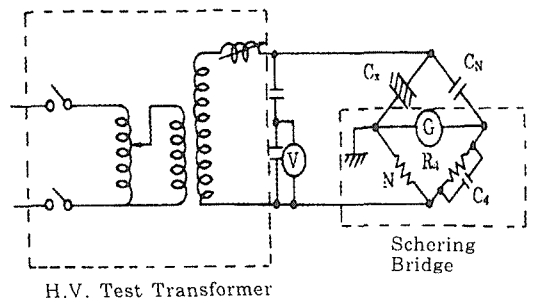
유전체 절연물에 교류전계를 가할 때는 일반적으로 누설전류, 유전분극, 부분방전 등에 의한 유전손(dielectric loss)이라는 에너지 손실이 발생하고, 이를 나타내는 척도로서 Tan Delta($\tan \delta$)를 사용한다. 이것을 유전정접 또는 유전체 역율(dielectric loss tangent or dielectric dissipation factor)이라 부르고, 이와 같이 절연체에 교류전압을 인가하여 측정되는 유전정접($\tan \delta$)의 변화율, 유전정접-전압($\tan \delta - V$) 특성, 정전용량(Capacitance) 변화율 등으로 부터 흡습/건조, 오손, 미소공극(void) 유무 등의 절연상태 및 열화정도를

추정하는 시험을 유전정접($\tan \delta$) 및 정전용량(C_x) 시험이라 한다.

인가전압을 증가시킴에 따라 절연물 내의 결함에서 부분방전이 발생하면 $\tan \delta$ 가 증가한다는 사실로부터, 유전정접 시험에서는 정격 상전압($E/\sqrt{3}$)에서의 $\tan \delta$ 와 부분방전이 나타나지 않는 낮은 전압에서의 $\tan \delta$ ($\tan \delta_0$)와의 차이인 $\Delta \tan \delta$ 를 이용하여 흡습정도, 오손 절연상태 및 열화정도를 추정한다.

나. 試驗回路

일반적으로 유전정접($\tan \delta$) 및 정전용량(C_x) 측정에는 Bridge 회로가 이용되고 있으며, 본 연구에서 사용한 장비는 Automatic Schering Bridge로서, 그 측정 원리는 (그림 2-5)와 같다.



(그림 2-5) 유전정접($\tan \delta$) 및 정전용량(C_x) 측정회로

다. 使用裝備

- 장 비 명 : [1] Automatic 12kV Insulation Test System(Schering Bridge)

- Capacitance and Dissipation/Power Factor Test Set (1)
- High Voltage Control Unit (2)
- High Voltage Supply (3)
- Resonating Inductor (4) 또는,
[2] Fully Automatic C and $\tan \delta$ Precision Measuring Bridge(Schering Bridge)
- C and $\tan \delta$ Automatic Measuring Bridge (5)
- Type 2876—JS Microcomputer, Screen & Keyboard (6)

- 제작회사 : Tettex Instruments(스위스)
- 모 델 명 : (1) Type. 2818—QA,
(2) Type. 5283—CU/UE,
(3) Type. 2818/5283—QA,
(4) Type. 5283—UO,
(5) Type. 2876—JS,
(6) Model. VT320—C3,
(7) Type. 3380
- 동작전원 : AC 220 V, 20 A

라. 試驗節次[1번 장비 사용시]

- (1) 발전기 각상의 출력측(Line Side) 및 중성점(Neutral Side)을 분리하여 각상별로 완전히 독립회로가 되도록 한다.
- (2) 시험하지 않는 상과 발전기 외함(Frame)을 접지(ground)시킨 상태에서 유전정접 측정기(Schering Bridge)를 연결하여 한상씩 시험을 수행한다.
- (3) 고정자 권선이 Slot 부분에서 Guard가 있고, 접지되어 있으므로 측정모드를 GSTg (Grounded Specimen Test with Guarding)

- A mode에서 설정하여 측정한다.

- (4) 각 상별로 교류전압을 $E/\sqrt{3}$ (상전압)[kV] 까지 일정간격으로(1kV씩) 상승시켜 각 Step별로 유전정접($\tan \delta$)과 정전용량(C_x)을 측정하며, 이때 정격 상전압의 25[%]와 100[%]에서 측정한 $\tan \delta$ 의 차이인 $\Delta \tan \delta$ 와 정전용량의 변화율($\Delta C/Co$)을 계산한다.

마. 結果分析

유전정접의 변화율인 $\Delta \tan \delta$ 는 절연물의 치수, 형상에 관계없이 부분방전 등에 의한 유전손의 증가분이기 때문에 적을수록 양호한 절연체이고, 고정자 권선 내부의 미소공극(void)의 과다 여부 등 권선 제작공정에서의 결함유무와 장기간 사용된 권선의 절연열화 상태를 나타내는 것으로서, 미국(EPRI)은 정격 상전압($E/\sqrt{3}$)의 25%에서 100% 전압에서 측정한 $\tan \delta$ 차이를 $\Delta \tan \delta$ 로 나타내고, 이때 Epoxy—Mica 절연 권선의 경우 1[%] 미만이면 양호하다고 판정하고 있으며, 일본의 경우에는 $1.25 \times E/\sqrt{3}$ [kV]에서 2.5[%] 이상이 되면 불량한 것으로 판정하고 있다.

정전용량의 변화율을 나타내는 $\Delta C/Co$ 의 경우는 아직까지 판정기준이 제정되지 않았지만, 참고적으로 활용하고 있다.

2.5 部分放電 試驗(PD Test)

가. 概要

최근의 전력기기는 대용량의 전력공급을 위해 초고압화되는 경향이 있고, 보다 높은 신뢰성을

요구하고 있다. 이에 따라 전력기기의 안전운전과 밀접한 관련이 있는 절연열화의 정도를 판정할 수 있는 방법에 대한 연구가 활발이 이루어져 왔고, 절연물이 열화되었을 때 기기 내부에서 발생하는 부분방전(Partial Discharge ; PD)을 측정하여 절연상태를 판단하는 방법이 널리 이용되고 있다.

대형 고전압 회전기 고정자 권선의 경우, 사용시간의 증가로 인해 권선이 열화되어 절연층에 미소공극(void), 균열(crack), 박리(delamination) 등이 생기면 이 결합부에서 부분방전 펄스전류가 발생한다. 이 부분방전을 검출하여 전기적인 절연물의 열화상태 뿐만 아니라 과열이나 주기적 응력에 의한 권선단말(Endwinding)에서의 표면방전(Surface Discharge), 웨지(Wedge)이완, 그리고 슬롯(Slot) 방전 등의 이상상태도 신뢰성 있게 판별할 수 있다고 알려져 있다.

절연물내의 국부적인 열화를 검출하는 수단으로서는 최대 부분방전 전하량(Qm)을 사용하고, 일반적으로 절연열화가 진행되면 방전전하가 커지고 방전 발생갯수[빈도] 또한 증가하여 Qm이 커지면 절연 파괴전압이 저하되는 관계를 이용해서 절연열화의 정도를 판단한다.

부분방전 시험에서 부분방전 개시전압(Discharge Inception Voltage ; DIV)은 절연물 내에 존재하는 미소공극 등의 결합부분 중 가장 낮은 전압에서 방전하는 결합부의 방전 개시전압을 나타내는 것으로서, 일반적으로 500[pC] 또는 1,000[pC] 크기의 방전량이 발생할 때의 전압을 기준으로 삼고 있으며, 슬롯 방전이 발생하는 것을 감지할 수 있다.

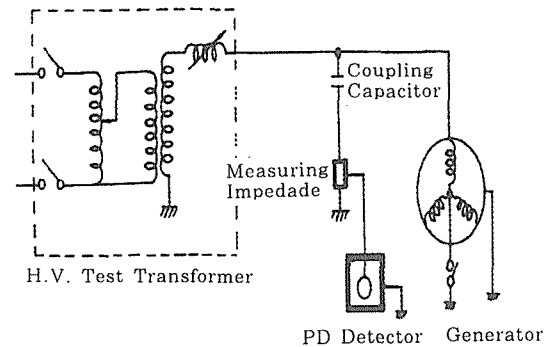
또한, 발전기의 정격 상전압($E/\sqrt{3}$)에서의 최대 부분방전의 크기인 $Qm1[pC]$ 과 $1.25 \times E/\sqrt{3}$ [kV]에서 측정된 최대 부분방전의 크기 $Qm2$

[pC]의 비인 Nq (표면방전 발생지수)를 아래의 식에 의해 산출하여 그 크기가 2 이상이 되면 표면방전(Surface Discharge)이 발생되고 있다고 판정하고 있다.

$$Nq = 10 \times \log(Qm2/Qm1)$$

나. 試驗回路

발전기 고정자 권선에 대한 부분방전 측정회로는 (그림 2-6)과 같다.



(그림 2-6) 부분방전 측정회로

다. 使用裝備

- 장비명 : Partial Discharge Detector (1) + Coupling Capacitor Matching Units (2) + Coupling Capacitor for PD Measurement(1,000pF) (3)
- 제작회사 : Tettex Instruments(스위스)
- 모델명 : (1) Type. 9124-OW
(2) Type. 9233/1-OW
(3) Type. 9230/100/1
- 동작전원 : AC 110/220 V, 10 A
- 주파수 대역 : 40~20kHz(Type. 9120 AK)

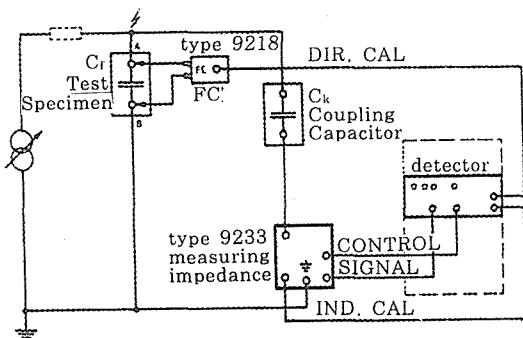
Conventional Amplifier)

라. 試驗節次

- (1) 발전기 고정자 권선 각상의 출력측(Line Side) 및 중성점(Neutral Side)을 분리하여 각상별로 완전히 독립회로가 되도록 한다.
- (2) 시험하지 않는 상(Phase)과 발전기 외함(Frame)을 접지(ground)시킨 상태에서 (그림 2-6)과 같이 부분방전 측정회로를 구성하여 한상씩 개별적으로 시험을 수행한다.
- (3) 1,000pF Coupling Capacitor(C_k)와 Measuring Impedance(Matching Units ; Type. 9233)도 함께 연결한다.
- (4) 부분방전 측정기(PD Detector ; Type. 9120)의 측정 주파수 대역은 Conventional Amplifier를 사용하여 40~200kHz로 설정한다.

bration(교정) 신호를 피시품(발전기 고정자 권선)의 양단(단자와 접지간)에 (그림 2-7)과 같이 주입하여 부분방전 신호에 대한 기기의 직접교정(Direct Calibration)을 수행한다.

- (6) 각종 전자파 및 접지선을 따라 전파되는 외부잡음(External Noise)이 10,000pC를 초과할 때는 50,000pC으로 Calibration을 수행한다.
- (7) 고정자 권선의 각 상별로 1,000pC의 부분방전이 발생할 때의 인가전압을 판독하여 부분방전 개시전압(DIV)을 측정한다.
- (8) 고정자 권선의 각 상별로 교류전압을 정격상전압($E/\sqrt{3}$) 또는 상전압의 1.25배 전압($1.25 \times E/\sqrt{3}$)까지 인가하여 각상의 최대 부분방전 전하량(Q_m)를 측정하고, 표면방전 발생지수 N_q 를 계산한다.



(그림 2-7) Tettex PD Detector (Type. 9124)를 사용한 부분방전 측정회로

- (5) Calibration Signal Coupler (Type. 9218)를 이용하여 1,000pC 또는 10,000pC의 Cali-

마. 結果分析

미국 EPRI에서 제시한 고정자 권선에 대한 부분방전 시험에서의 절연상태 판정기준은 $E/\sqrt{3}$ [kV]에서의 최대 부분방전 전하량(Q_{m1})이 10,000[pC] 이하이면 수년안에는 권선이 절연 파괴되지 않으며, 10,000[pC]을 초과하면 육안검사를 수행해야 한다고 밝히고 있으며, 부분방전 개시전압(DIV)이 $E/\sqrt{3}$ [kV]의 1/2 이하일 때에는 슬롯방전(Slot Discharge)이 발생하고 있다고 판정한다.

한편, 일본에서는 Q_{m1} 이 10,000~30,000[pC] 일 경우에 요주의, 30,000[pC] 이상일 경우에는 권선의 절연상태가 불량하다고 판정하고 있다. 또한, Q_{m1} 과 상전압의 1.25배 전압($1.25 \times E/\sqrt{3}$)

까지 인가하여 측정한 최대 부분방전 전하량 (Q_m)을 이용하여 계산한 표면방전 발생지수 N_q 가 2 이상이면 단말권선에서 표면방전이 발생되고 있다고 판단한다.

따라서 발전기 운전의 신뢰성 확보와 경제적인 예방정비에 의한 사용 수명연장을 위하여 정확한 절연 열화 진단기법이 매우 중요하게 인식되고 있다.

3. 판정基準 設定

발전기 고정자 권선의 절연 시스템은 운전시간의 경과에 따라 열화가 진행되며, 결국에는 불시의 운전정지와 장기간의 복구시간이 요구되는 절연파괴 현상을 초래하게 된다. 따라서 사고를 미연에 방지하고 경제적인 정비계획 수립 및 운전의 신뢰성 확보를 위해서는, 고정자 권선의 절연열화 상태, 특히 부분방전의 크기를 사전에 측정하여 열화정도를 평가하는 것이 중요하다.

발전기 고정자 권선에 대한 절연열화의 판정기준에 관한 연구는, 일본과 북미를 중심으로 활발히 이루어져 왔고, 국내에서는 현재까지 일본의 판정기준을 적용하여 절연열화 상태를 판정하고 있으나, 이 기준의 신뢰성에 대해서는 일부 문제점이 제기되고 있다.

본 논문에서는 발전기 고정자 권선의 절연상태 평가의 신뢰도 향상을 위한 새로운 파라메타로서, 부분방전 개시전압(Discharge Inception Voltage ; DIV)에서의 부분방전 크기를 기준으로 전압에 따른 최대 부분방전 크기의 증가율을 나타내는, 부분방전 변화지수(Partial Discharge

Index ; PDI)를 제시한다.

본 연구에서 사용된 고정자 권선은, 실제 운전에 의해 장기간에 걸쳐 전기적, 기계적, 열적으로 열화된 Polyester 절연의 17kV, 300MVA급 화력 발전기에서 채취한 것으로, 다양한 (비)파괴 시험을 통해서 절연파괴 전압(Breakdown Voltage ; V_{BD})과 PDI와의 상관관계를 규명하고, PDI를 이용한 절연열화 판정기준을 제안한다.

또한, 유전정접($\Delta \tan \delta$), 정전용량($\Delta C/Co$), 교류전류(Δ) 시험 등의 각종 비파괴 파라메타와 부분방전 크기 및 절연파괴 전압과의 상호 연관성을 분석한 결과를 제시한다.

3.1 일본의 판정기준

일본은 실험실적 강제열화 및 장기간 사용된 고정자 권선을 이용한 파괴시험과 비파괴 시험의 비교분석에 의해 고유의 절연열화 판정기준을 확립하였고, 정격전압이 11[kV]를 초과하는 대형 발전기 고정자 권선에 대한 일본의 판정기준은, 1988년 전력중앙연구소(CRIEPI)의 보고서와 이를 인용하여 1993년 Mitsubishi에 의해 발표된 논문에서, Polyester 및 Epoxy 절연 권선에 대해 <표 1>과 같이 제시하였다.

CRIEPI에서 제안된 판정절차는 고정자 권선의 국부적인 열화를 가장 잘 반영하는 최대 부분방전 크기(Q_m)을 우선적으로 적용하며, 유전정접 변화율($\Delta \tan \delta$)은 전체 권선의 열화정도를 평균한 값을 나타내기 때문에 보조적으로만 사용하도록 하였다.

(표 1)

CRIEPE에서 제안된 절연열화 판정기준

시험항목	판정항목	절연열화 판정기준		열화판정
부분방전 (PD)	Q_m $(E/\sqrt{3} \text{ kV})$ N_q $(E/\sqrt{3} \sim 1.25 \times E/\sqrt{3} \text{ kV})$	I	Q_m 이 10,000pC 미만	양 호
		II	Q_m 이 10,000pC 이상	요 주 의
		III	Q_m 이 30,000pC 이상, N_q 가 2.0 미만	불 량
		IV	Q_m 이 30,000pC 이상, N_q 가 2.0 이상	표면방전
유전정접 ($\tan \delta$)	$\Delta \tan \delta$ $(E \text{ kV})$	I	2.0% 미만	양 호
		II	2.0% 미만	요 주 의
		III	2.0% 미만	불 량

(표 2)

EPRI에서 제안된 고정자 권선의 열화 판정기준

측정방식	측정항목	불량 판정기준		불량판정
정 지 중 (Off-Line)	성극지수 (P.I.)	Asphalt t절연	2이하 (표면오손)	On-Line 측정시의 Q_m , NQN 기준을 모두 초과할 경우 에만 Off- Line 진단을 실시함
		Epoxy 절연	1분후 저항 > 1,000M Ω ⇒ 실시 안함	
			1분후 저항 < 1,000M Ω ⇒ 1 이하	
	방전개시전압 (D.I.V.)	$E/\sqrt{3} \text{ kV}$ 의 1/2 이하 (Slot 방전)		
	Q_m ($E/\sqrt{3} \text{ kV}$)	1,000pC 이상		
$\Delta \tan \delta$ ($E/\sqrt{3} \text{ kV}$)	1% 이상			
운 전 중 (On-Line)	Q_m , NQN	Q_m 과 NQN 이 연속적으로 6개월에 2배 이상 증가		

3.2 북미의 절연열화 판정기준

북미와 유럽에서도 발전기 고정자 권선의 절연 상태 평가에 대해서 많은 관심을 가져 왔으나, 일본과는 달리 정지중(Off-Line) 뿐만 아니라 운전중(On-Line)인 상태에서의 진단시험도 병행하고

있으며, 이때 부분방전 및 유전정접 크기의 절대 값을 기준으로 하지 않고, 발전기 운전시간의 경과에 따른 부분방전 크기의 변화 추이(trend)에 따라 절연열화 상태를 판정하고 있다.

1989년에 발간된 EPRI 보고서에 의하면, (표 2)에서와 같이 정격 상전압($E/\sqrt{3} \text{ kV}$)을 인가하

여 Q_m 이 10,000pC 이상이면 권선에 대한 육안검사 실시를 권고하고 있으며, 통상적으로 부분방전의 측정값이 연속적으로 6개월에 2배 이상 증가할 경우에 정지중 정밀 진단시험을 통해 절연열화 정도를 판정하고 있으며, 고정자 권선의 잔존수명을 예측하는 것은 불가능하다고 주장하고 있다.

3.3 대상 발전기 및 실험방법

3.3.1 대상 발전기의 사양

발전기 고정자 권선의 절연열화 판정기준을 설정하기 위해 본 연구에서 사용한 시료는, 1970년 최초 계통투입 이후 1996년 2월까지 약 25년 동안의 운전이력을 가진 300MVA, 17kV급, Polyester 절연의 발전기 고정자 권선으로서, 제작사는 일본 TOSHIBA이고, 발전기의 자세한 사양은 <표 3>과 같다.

<표 3> 발전기 사양

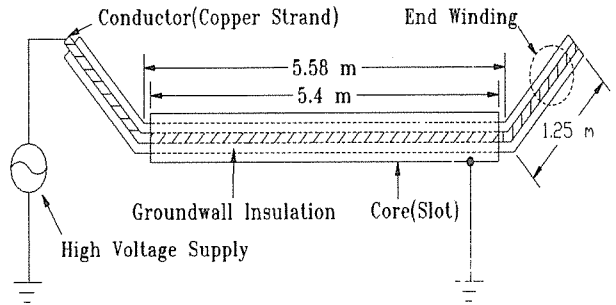
정격용량	300MVA	절연종류	Polyster
정격(단자) 전압	17kV	정격(상)전류	10,188A

3.3.2 실험방법

실험에 사용된 고정자 권선은, Endwinding이 있는 (그림 3-1)과 같은 형태로서, 실제 발전기와 보다 유사하게 하기 위해 모의슬롯에 고정자 권선을 한 개씩 설치하여 실험실적 (비)파괴 실험을 수행하였다.

시험항목은 현재까지 전세계적으로 널리 사용되고 있는 발전기 절연진단 시험 즉, 교류전류(ΔI),

유전정접($\Delta \tan \delta$) 및 정전용량($\Delta C/Co$), 부분방전 개시전압(DIV) 및 부분방전(Q_m) 시험 등의 비파괴 시험과 절연파괴(V_{BD}) 시험을 모두 실시하였다.



(그림 3-1) 고정자 권선의 형태 및 실험방법

또한, 절연열화 판정기준으로 가장 중요하게 취급되는 부분방전 시험에서는 부분방전 측정기(PD Detector)의 주파수의 영향을 분석하기 위해서 여러가지의 주파수 대역에서 시험을 수행하여 새로운 절연열화 판정기준의 설정을 도모하였다.

3.3.3 실험결과 및 검토

<표 4>는 각각의 시료별로 실험실적 (비)파괴 시험결과를 나타낸 것으로서, 정격전압(E)에서의 전류값으로 추정하여 계산한 교류전류의 변화율 ΔI , 유전손의 증가율(유전정접)인 $\Delta \tan \delta (\Delta T)$, 정전용량의 증가율 $\Delta C/Co (\Delta C)$ 를 나타내었으며, 부분방전 시험과 교류 절연파괴 시험의 결과도 함께 나타내었다. 각각의 증가율 및 변화율은, 정격상전압(9.82kV)의 25[%] 전압(2.46kV)에서의 측정값을 기준으로 상전압의 125[%] 전압(12.3kV)에서 측정된 값과 비교하여 계산하였다.

부분방전 시험에서는 각 시료별로 1,000[pC]의

(표 4)

시료별 (비)파괴 시험결과

시험 종류 시료	교류 전류 ΔI [%]	유전 정접 ΔT [%]	정전 용량 ΔC [%]	부분방전 시험			절연파괴 시험	
				DIV_0 kV	Q_{m3} pC	Q_{m4} pC	V_{BD} [kV]	파괴 지점
#12	3.63	2.29	3.45	3.81	17,000	18,000	61	내부
#13	1.47	1.28	1.6	4.25	12,000	13,000	84	내부
#14	3.27	2.08	3.21	4.69	23,000	25,000	78	내부
#15	1.81	1.44	1.93	4.46	18,000	22,000	89	내부
#16	1.99	1.58	2.18	4.45	16,000	20,000	100	연면
#17	0.72	0.77	1.17	3.32	40,000	50,000	78	외부
#18	1.84	1.57	2.22	1.66	32,000	34,000	76	연면
#19	3.48	1.92	2.71	4.01	18,000	19,000	100	내부
#20	2.64	1.89	2.35	4.16	41,000	55,000	90	외부
#21	2.26	2.03	2.8	4.66	33,000	35,000	98	외부
#22	2.08	1.45	2.44	4.59	15,000	17,000	72	내부
#23	2.41	1.38	11.1	4.85	6,500	7,000	64	연면
#24	4.11	2.27	3.82	3.99	12,000	13,000	64	연면
#25	4.22	2.47	3.88	4.34	5,800	7,000	65	연면
#26	1.11	1.08	1.6	4.61	4,500	9,000	80	연면
#27	3.51	2.14	3.8	3.65	10,000	12,000	77	연면
#28	1.44	1.2	1.51	5.12	21,000	22,000	100	내부
#29	0.54	0.79	1.16	4.47	24,000	25,000	95	내부
#30	1.99	1.4	1.93	4.83	5,800	5,900	50	내부
#31	0.53	0.52	0.73	4.24	28,000	28,000	15	내부

부분방전이 발생할 때의 부분방전 개시전압(DIV)과 정격 상전압의 100, 125[%]의 2가지 전압에서 측정된 최대 부분방전의 크기(Q_m)를 나타내었다.

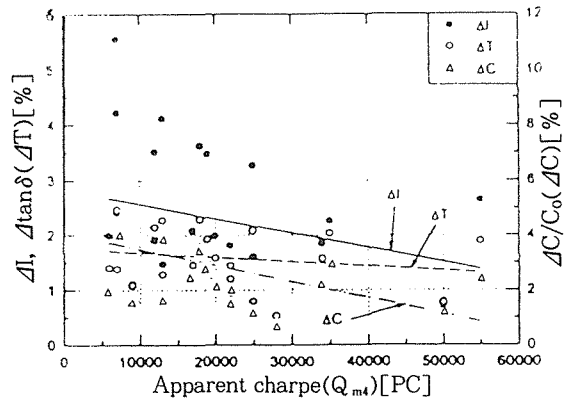
실험에 사용한 부분방전 측정기는 Tettex Instruments사의 Partial Discharge Measuring System(Type. 9124)으로서, 100[pF]의 Coup-

ling Capacitor를 이용하였고, 일반적인 증폭기(Con. Amp.)를 이용한 경우의 측정 주파수 대역은 40~200[kHz]이다. 또한, 고정자 권선에 교류(AC) 고전압 인가와 교류전류(ΔI), 유전정접($\Delta \tan \delta$) 및 정전용량($\Delta C/Co$) 시험은 Tettex Instruments사의 "Automatic 12kV Insulation Test System(Type. 2818 QA)"을 사용하였다.

각 시료별로 권선을 모의슬롯에 설치한 상태로 수행한 절연파괴 시험(Breakdown Test)은 최대 정격이 100[kV], 1[A]인 Hipotronics사의 교류 내전압 시험기(AC Dielectric Test System)를 사용하였고, 그 결과를 <표 4>에 절연파괴 전압(V_{BD})과 파괴지점을 함께 나타내었다. 이때 파괴지점이 슬롯 내부인 시료(#12~15, #19, #22, #28~#31) 10개 만이 실제 권선의 주절연이 절연파괴된 것을 의미하고, 슬롯 외부에서 파괴되었거나 연면방전 발생에 의해 파괴된 시료는 절연 파괴되지 않았다는 것을 나타낸다.

<표 4>에서 정격 상전압(9.82kV)에서의 부분방전 크기(Q_{m3})에 대해 절연이 파괴된 시료와 파괴되지 않은 시료를 상호 비교해 보면, 절연파괴 시료의 Q_{m3} 는 대부분 10,000~28,000[pC] 사이지만 시료 #30은 5,800[pC]으로 10,000[pC] 이하이고, 파괴되지 않은 시료의 Q_{m3} 는 4,500~41,000[pC]으로서 절연이 파괴된 시료보다도 오히려 부분방전이 큰 경우도 있다. 따라서 최대 부분방전 크기의 절대값만으로는 절연상태를 명확하게 판정할 수 없음을 알 수 있다.

(그림 3-2)는 각각의 시료별로 정격 상전압의 1.25배 전압에서 측정된 최대 부분방전 크기(Q_{m4})와 교류전류 변화율(ΔI), 유전정접 증가율($\Delta \tan \delta$) 및 정전용량 증가율($\Delta C/Co$)과의 관계를 나타낸 것으로서, 고정자 권선의 오손 및 흡습 정도와 절연물의 열화정도를 비교적 잘 나타낸다고 알려진 ΔI , $\Delta \tan \delta$, $\Delta C/Co$ 가 부분방전 크기(Q_{m4})와 상관관계가 거의 없음을 볼 수 있다. 이것은 ΔI , $\Delta \tan \delta$ 및 $\Delta C/Co$ 가 절연물의 평균적인 열화상태를 나타내는 반면에 Q_{m4} 는 고정자 권선의 국부적인 열화지점에서 발생하는 부분방전 크기를 나타내기 때문인 것으로 판단된다.

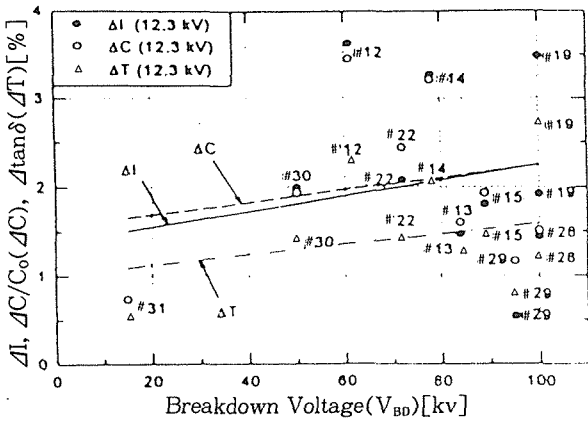


(그림 3-2) 부분방전(Q_m)과 $\Delta \tan \delta$ 및 $\Delta C/Co$ 의 관계

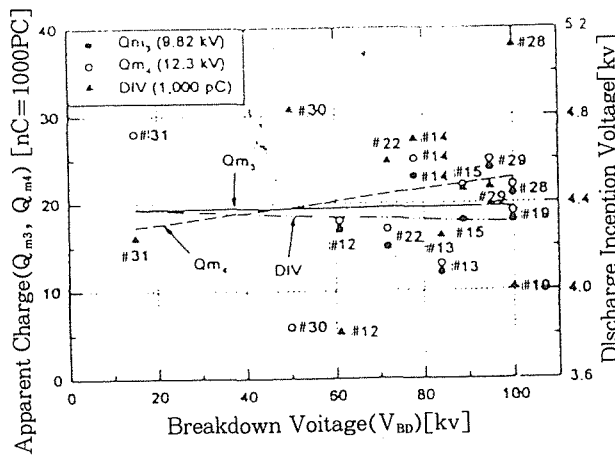
(그림 3-3)과 (그림 3-4)는 절연파괴 전압(V_{BD})과 ΔI , $\Delta \tan \delta$ 및 Q_m 과의 관계를 나타낸 것으로서, 그림에 나타난 시료는 슬롯내에서 실제 절연파괴가 발생한 권선만을 이용하였다. 장기간 사용한 고정자 권선에 대한 파괴시험에서의 절연 열화 판정기준은 절연파괴 전압(V_{BD})이 $2E+1$ [V] 이하이면 불량한 상태로 판정하고 있으므로, 본 연구에서 사용한 고정자 권선의 경우에는 V_{BD} 가 $2 \times 17 + 1 = 35$ [kV] 이하에서 절연파괴가 발생하면 불량한 것으로 볼 수 있다.

V_{BD} 와 ΔI 및 $\Delta \tan \delta$ 의 관계를 나타낸 (그림 3-3)을 보면, 슬롯 내부에서 35[kV] 이하에서 절연파괴된 #31 시료는 파괴된 시료중 정격 상전압에서 부분방전 크기가 가장 큼에도 불구하고 ΔI 와 $\Delta \tan \delta$ 는 다른 시료보다 낮으며, 파괴전압에 대한 ΔI 및 $\Delta \tan \delta$ 의 분포는 전체적으로 분산되어 있으므로 상관관계가 거의 없다.

또한, (그림 3-4)에서 1,000[pC]을 기준으로 한 부분방전 개시전압(DIV) 및 최대 부분방전 크기(Q_m)와 절연파괴 전압(V_{BD}) 사이에도 상관관계가 없음을 볼 수 있다.



(그림 3-3) 절연파괴 전압(V_{BD})과 $\Delta \tan \delta$ 및 ΔI 의 관계



(그림 3-4) 절연파괴 전압(V_{BD})과 Q_m 및 DIV의 관계

이와 같이 비파괴 시험에 의해 측정된 부분방전 크기, 유전정점 증가율 등의 각종 파라메타와 절연파괴 전압간에는 특징적인 상관관계가 나타나지 않기 때문에 새로운 개념의 절연열화 판정기준의 설정이 필요하다.

3.4 부분방전 변화지수(PDI)의 적용

3.4.1 부분방전 변화지수(PDI)의 개발

발전기 고정자 권선의 절연열화 상태를 평가하기 위해 중요하게 취급되고 있는 파라메타 가운데 절연물의 미소공극(void)에서 발생하는 부분방전의 최대값을 측정하여 그 절대값 또는 변화추이(trend)를 분석하여 절연상태를 평가하는 것이 현재까지 가장 신뢰성 있다고 인정되고 있다.

그러나 부분방전을 측정하기 위해 사용되는 부분방전 측정기(PD Detector)와 측정 주파수 대역에 따라 부분방전의 최대 크기가 다르게 측정되고, 권선의 인덕턴스 성분으로 인해 교정(Calibration)이 어렵다는 문제점이 있기 때문에 절대값에 의한 판정 뿐만 아니라 사용시간에 따른 변화추이를 분석하기에도 어려운 점이 있었다. 아울러 앞에서 언급한 바와 같이 최대 부분방전의 절대 크기로는 절연열화 상태를 명확하게 평가할 수가 없다.

이를 해결하기 위해 본 연구에서는, 전압에 따른 부분방전 크기의 변화율인 ΔPD (Delta Partial Discharge)의 개념을 사용한 새로운 절연열화 판정을 위한 파라메타로서, 부분방전 변화지수(PDI ; Partial Discharge Index)를 도입하였다.

PDI는 부분방전 개시전압(DIV)[kV]에서의 부분방전 크기인 1,000[pC]을 기준으로 전압 상승에 따른 최대 부분방전 크기의 증가율을 나타낸 것으로서 다음 식과 같이 정의하였다.

$$PDI = (Q_n - 1,000) / (V_n - DIV) \text{ [pC/Rv]}$$

여기서, Q_n : 임의의 전압에서의 최대 부분방전 크기 [pC]

V_n : 임의의 인가전압 [kV]

부분방전 변화지수(PDI)를 도입한 이유는, 부

부분방전이 발생하기 시작하는 부분방전 개시전압이 교류 절연파괴 전압과 상관관계가 비교적 높고, 전압인가 초기에 부분방전이 크게 발생하면 절연물의 열화가 많이 진행되었다고 판단하였기 때문이다.

3.4.2 PDI에 의한 절연열화 평가

부분방전 변화지수(PDI)의 정의에 의해 도출한 결과를 시료에 따라 절연파괴 전압과 함께 <표 5>에 나타내었으며, 부분방전 측정기의 주파수에 따른 영향을 고려하기 위해서 3종류(0, 1, 2)의 주파수 대역을 선정하여 최대 부분방전 크기(Q_m)와 부분방전 개시전압(DIV)를 측정하였다. 이때 PDI의 기준전압은 정격 상전압의 50[%] 전압(4.91kV)으로 설정하였고, 부분방전 측정기의 주파수 대역 선정은 부분방전이 가장 크게 측정되는 영역인 570[kHz] 대역으로 하였다. 이 대역이 본 연구에서 사용한 시료와 측정 시스템간의 공진 주파수 영역인 것으로 판단된다.

3가지 종류의 주파수 대역에서 측정한 전압에 따른 부분방전 크기 증가율을 이용하여 산출한 PDI를 나타낸 (그림 3-5)를 보면, 절연파괴 전압(V_{BD})이 낮을수록 PDI는 증가하고, 높은 전압에서 절연파괴되어 절연내력이 충분한 시료일수록 PDI가 감소하고 있으므로 고정자 권선의 절연열화 상태를 매우 잘 나타냄을 볼 수 있다.

따라서 본 논문에서는 (그림 3-5)의 각각의 부분방전 측정 주파수 대역에 따른 PDI의 기울기로 부터, 17kV급 Polyester 절연 고정자 권선에 대한 절연열화 판정기준을 <표 5>와 같이 PDI₁이 10,000 PDI₂ 및 PDI₃가 20,000[pC/kV] 이상이면 절연상태가 불량하다고 판정할 것을 제안한다.

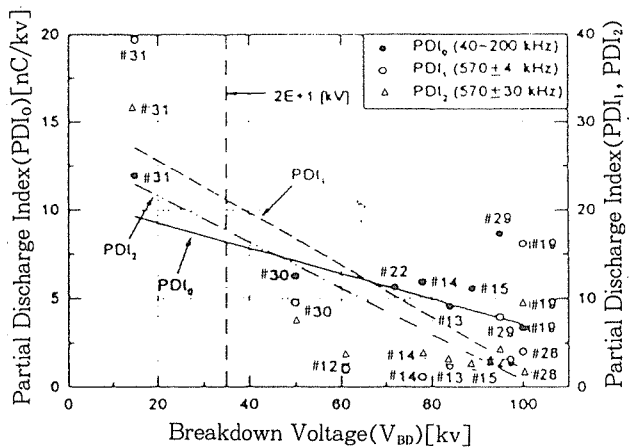
정격 상전압에서의 부분방전 크기(Q_{m3})에 의한

일본의 판정기준과 본 연구에서 제시한 상기의 판정기준을 절연파괴전압(V_{BD})을 통해서 비교해 보면 다음과 같다.

- Q_{m3} 에 의해 불량으로 판정되는 4개의 시료(#17, 18, 20, 21)는 모두 연면방전이나 슬롯 외부에서 파괴되어 V_{BD} 와 상관관계가 없고, 절연내력이 양호한 것을 알 수 있다.

- PDI를 이용한 각 시료의 절연상태 평가에서 는, 장기간 사용된 고정자 권선의 운전에 필요한 절연내력($2E+1=35kV$) 이하에서 절연 파괴된 시료인 #31은 각각의 주파수 대역에서 모두 불량한 것으로 판정됨을 알 수 있다.

그러므로 부분방전의 절대값에 의한 기준은 절연열화 정도를 잘못 판정하여 실제의 절연상태를 정확하게 나타내지 못할 가능성이 있지만, 본 연구에서 제시한 부분방전 변화지수(PDI)에 의한 절연열화 진단기법은 고정자 권선의 절연상태를 매우 잘 나타낸다고 할 수 있다.



(그림 3-5) 부분방전 변화지수와 절연파괴 전압과의 관계

PDI를 사용하여 절연상태를 판정하게 되면, 정

<표 5>

시료별 부분방전 변화지수

시험 종류	부분방전 개시전압(kV) 및 최대 부분방전 크기(nC=1,000pC)							부분방전 변화지수 - Partial Discharge Index ; PDI [pC/kV]			절연 파괴 전압 V _{BD} [kV]
	측 정 주파수	40~200 [kHz]	570±4 [kHz]		570±30 [kHz]		40~ 200	PDI ₀	PDI ₁	PDI ₂	
항목 시료	DIV ₀ [kV]	Q _{m0} [nC]	DIV ₁ [kV]	Q _{m1} [nC]	DIV ₂ [kV]	Q _{m2} [nC]	Q _{m3} [nC]	PDI ₀	PDI ₁	PDI ₂	[kV]
#12	3.81	2.0	3.95	3.0	3.99	3.5	17	909	2,083	2,717	61
#13	4.25	4.0	4.1	2.9	3.93	3.8	12	4,545	2,346	2,857	84
#14	4.69	2.3	5.09	0.8	4.77	1.5	23	5,909	1,111	3,571	78
#15	4.46	3.5	3.8	4.0	3.33	5.0	18	5,555	2,703	2,532	89
#16	4.45	1.5	4.6	5.0	4.62	7.0	16	1,087	12,903	20,690	100
#17	3.32	11	4.0	23	—	20	40	6,289	24,176	—	78
#18	1.66	4.0	3.58	4.7	3.25	4.0	32	923	2,782	1,807	76
#19	4.01	4.0	4.23	12	3.94	10	18	3,333	16,176	9,278	100
#20	4.16	1.2	4.16	2.0	4.61	1.8	41	266	1,333	2,667	90
#21	4.66	7.0	4.18	12	4.35	10	33	24,000	15,068	16,071	98
#22	4.59	2.8	—	5.0	—	3.5	15	5,625	—	—	72
#23	4.85	1.2	4.25	5.0	4.43	4.0	6.5	3,333	6,061	6,250	64
#24	3.99	2.8	3.85	15	3.92	8.5	12	1,957	13,208	7,576	64
#25	4.34	2.0	3.8	13	3.87	9.0	5.8	1,754	10,811	7,692	65
#26	4.61	1.4	3.82	8.0	4.0	4.2	4.5	1,333	6,422	3,516	80
#27	3.65	1.3	—	4.0	—	3.5	10	238	—	—	77
#28	5.12	0.8	4.86	1.2	4.49	1.8	21	952	4,000	1,905	100
#29	4.47	4.8	4.34	5.5	4.44	3.0	24	8,636	7,895	4,255	95
#30	4.83	1.5	4.7	3.0	4.71	2.5	5.8	6,250	9,524	7,500	50
#31	4.24	9.0	4.3	25	4.37	18	28	11,940	39,344	31,481	15
절연열화 판정기준 (Q _{m3} = 일본기준)	요주의 판정기준						10.0	5,000	15,000	15,000	52.515 × [2E+1]
	불량 판정기준						30.0	10,000	20,000	20,000	35 [2E+1]

격전압이 높은 발전기를 각 상별로 시험하기 위해 인가하는 고전압을 정격 상전압 이하로 감소시킬 수 있으므로 시험에 필요한 전원장치(Power Supply)의 용량을 보다 소형화할 수 있을 것으로 기대된다.

그러나 부분방전 측정시 외부에서 발생하는 잡음(Noise) 영향으로 DIV와 Q_m 을 정확하게 측정할 수 없을 경우에는 PDI를 산출할 수 없기 때문에 잡음제거 기법에 대한 연구와 개별 권선이 아닌 실제 발전기를 대상으로 한 공진 주파수의 영향 및 판정기준의 검증이 필요할 것으로 사료된다.

4. 結 論

본 논문에서는 대형 發電機 고정자 권선의 절연 상태 평가를 위한 새로운 파라메타인 부분방전 변화지수(PDI)와 이를 이용한 절연열화 판정기준을 제시하였고, 장기간 사용한 고정자 권선에 대한 다양한 (비)파괴 시험을 통해서 절연파괴 전압과 PDI 및 각종 비파괴 파라메타와의 상관관계를 연구한 결론은 다음과 같다.,

- (1) 교류전류의 변화율(ΔI), 유전정접 증가율($\Delta \tan \delta$), 정전용량의 증가율($\Delta C/Co$)과

최대 부분방전의 크기(Q_m)간에는 상관관계가 없다.

- (2) 정지중(Off-Line) 비파괴 시험에 의한 Parameter인 Q_m , ΔI , $\Delta \tan \delta$ 및 $\Delta C/Co$ 와 절연파괴 전압(V_{BD}) 사이에도 상관관계가 없다. 따라서 종래의 비파괴 진단시험에 의한 제반 Parameter의 절대값을 이용하여 발전기 고정자 권선의 절연열화를 평가하는 것은 실제의 절연상태를 정확하게 나타지 못할 수 있다.
- (3) 고정자 권선의 절연열화 평가를 위한 새로운 Parameter로서, 부분방전 개시전압(DIV)에서의 부분방전 크기(1,000pC)를 기준으로 전압 상승에 따른 최대 부분방전 크기의 증가율을 나타내는 부분방전 변화지수(PDI)를 제시하였다.
- (4) 17[kV]급 Polyester 절연 고정자 권선의 절연열화 상태에 대한 불량 판정기준을 제시하였고, 이 기준을 적용하여 정격 상전압의 50 [%]에서 PDI에 의한 절연열화 평가 결과, 절연파괴 전압(V_{BD})과 밀접한 相關關係를 확인하여 PDI가 고정자 권선의 절연열화 상태를 정확하게 나타낼 수 있음을 立證하였다.

