

발전기 권선에서의 신호전송 특성에 관한 연구

황 돈 하* · 김 진 봉* · 김 용 주* · 박 명 수** · 김 택 수**

* 한국전기연구소 전력기기연구부 ** 한전 기술연구원 전력연구실

A Study on the Signal Propagation Characteristics of Generator Windings

Don-Ha Hwang* · Jin-Bong Kim* · Yong-Joo Kim* · Myong-Soo Park** · Taek-Soo Kim**

* KERI Power Apparatus Laboratory ** KEPCO Research Center

<Abstract>

The detection and measurement of partial discharge activity prevalent in the solid insulating systems of high-voltage generator stator windings has, for many years, been a recognized method of assessing the insulation condition of such systems. Partial discharge activity occurs at sites of degradation within, or at the surface of, stator's insulation systems under high voltage stressing.

However, partial discharge pulses suffer from attenuation and distortion when transmitted along windings, because of the complex L-C network between windings. The mode of transmission varies with the signal frequency and is dependant on the geometrical configurations of windings.

This paper reports the investigated results of the signal propagation characteristics along the windings when both sinusoidal signals and simulated partial discharge pulses are injected at the various positions of stator windings within the 25 MVA, 11 kV hydro generator. The on-line identification technique of partial discharge location in generator windings is also proposed in this study.

1. 서 론

대형 발전기 고정자의 절연계통에서 발생하는 부분방전 활동의 시간에 따른 상대적 변화는 고정자 권선의 절연상태를 추정하는 데 있어서 매우 유용한 파라메타로 인정되어 부분방전의 검출과 측정에 대한 연구가 활발히 이루어져 왔다. 최근에는 발전기 정지중(off-line)에서의 부분방전 측정 뿐만 아니라 계통에 투입된 상태에서도 측정이 가능한 운전중(on-line) 부분방전 측정법이 소개되었고, 퍼지(fuzzy)나 신경 회로망(neural network) 기법을 이용한 부분방전의 검출이나 패턴인식에 대한 연구도 발표되고 있다[1~3].

한편, 부분방전 펄스가 발전기 고정자 권선을 따라 전파될 때는 권선간의 복잡한 L-C 회로망과 여러 가지 전파경로가 존재하기 때문에 신호의 감쇠와 왜곡이 심하다. 또한, 부분방전은 발생지점과 측정기기의 주파수 대역에 따라 측정값이 다르게 되

므로 권선의 열화상태를 정확히 판정하는 것은 어렵다고 인식되어 왔다[4]. 이러한 배경으로 부터, 근래에는 부분방전 신호의 전송특성 및 주파수 특성분석을 통하여 국부적으로 손상된 권선의 위치를 검출하기 위한 연구가 많이 이루어져 왔다. 그러나, 대부분의 연구가 부분방전을 모의한 교정신호(calibration signal)의 주입에 의한 정지중 실험만을 수행함으로써 운전중인 발전기 고정자 권선에서 발생된 실제의 부분방전 파형에 대한 검증은 이루어지지 않고 있다[5-6].

본 논문에서는 발전기 고정자 권선에서 국부적 손상지점의 위치탐지를 위한 부분방전 전송특성의 연구로서 25 MVA, 11 kV 급 단권 방식의 의암 #2 수력 발전기를 대상으로 한 필스 전파 특성 및 주파수에 따른 신호전송 특성을 조사하였다. 신호 발생기의 정현파 출력을 1~13 MHz의 주파수로 가변시키면서 고정자 권선에 직접 주입하여 전파된 신호를 정격 80 pF의 Coupling Capacitor(용량성 커패시터)에서 측정하고, 그 크기를 비교함으로써 주파수에 따른 고정자 권선과 용량성 커패시터의 신호전파 특성을 분석하였다. 또한, 상승시간이 실제 부분방전 펄스와 유사한 6~8 nano-sec인 필스를 권선의 여러 지점에 주입하여 전파되는 파형의 측정 및 분석에 의해 부분방전이 발생된 고정자 권선의 위치를 판정할 수 있는 기법을 제시하였다. 더우기 제시한 발전기 정지시의 모의신호에 의한 위치탐지 기법을 이용하여 실제 운전중인 발전기 고정자 권선에서 측정된 부분방전 신호를 분석함으로써 운전중 부분방전의 발생 위치탐지 연구도 수행하였다.

2. 실험 및 검토

2-1. Coupling Capacitor의 주파수 응답특성

발전기 고정자 권선에서의 신호전송 특성실험에 앞서서 본 연구에서 부분방전을 측정하기 위해 사용하는 정격 80 pF, 25 kV의 Coupling Capacitor인 용량성 커패시터의 주파수 응답특성을 조사하였다. 커패시터의 입력단자에 주파수를 1~13 MHz로 가변시킨 파고치 1 V인 신호 발생기의 정현파 신호를 직접 주입하고, 그 출력파형을 HP-54510A, 1 Giga Samples/sec, Digitizing Oscilloscope를 이용해서 50Ω 입력 임피던스로 측정하여 그림 1과 같은 결과를 얻었다. 응답전압(response voltage)의 크기는

과고치 전압이고, 그림에서 보는 바와 같이 본 연구에서 사용한 커플러는 10 MHz에서 신호의 응답특성이 가장 높았으며, 1 MHz에서 가장 낮았다. 따라서 빠른 상승시간의 고주파 성분인 부분방전 펄스의 측정에 적당함을 알 수 있고, 주파수 응답특성은 10 MHz/1 MHz의 비율이 30 정도 되었다.

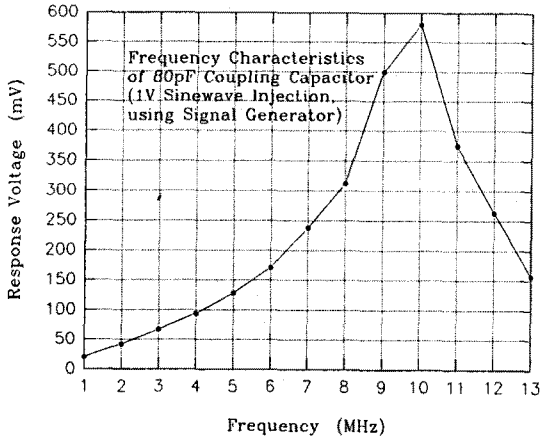


그림 1. Coupling Capacitor의 주파수 응답특성

2-2. 발전소 현장측정 조건

고장자 권선에서의 신호전송 특성연구를 위한 실험은 정격 25 MVA, 11 kV급 단권 권선방식의 약암 #2 수력 발전기를 대상으로 해서 회전자가 제거되는 전기 정비기간 중에 수행되었다. 의암 수력 2호기의 고장자 권선은 총 529개이며, 그림 2와 그림 3과 같이 발전기 C상에 대해서만 시험이 수행되었다. 0번 권선은 발전기의 출력단으로서 Coupling Capacitor(C2)를 연결시켰으며, 16번과 32번 권선은 각각 C상의 2~3번째 고압부 권선사이, 4~5번째 고압부 권선사이의 말단권선(endwinding)이다. 8번과 24번 권선은 C상의 저압부로서, 회로상으로는 중성점에 가까우나 실제적인 위치는 각각 2번째와 4번째 고압부 권선의 bottom 권선에서 인출된 endwinding이다. 40번 권선은 C상의 중성선으로서 다른 상의 중성선과 연결하기 위한 Ring Bus가 커플러와 30 Cm 정도의 이격거리를 두고 통과하고 있다. 7번, 11번, 22번 권선은 다른 상의 endwinding이고, 0~8, 8~16, 16~24, 24~32번 endwinding 사이는 각각 34 Cm씩 이격되어 있으며, 번호의 크기에 따라 신호주입 지점의 이격거리는 비례해서 커진다. 신호주입을 위해서 endwinding에 5×30 Cm의 aluminium foil을 부착시켰고, 이것의 Capacitance는 LCR meter(1 MHz)에 의해

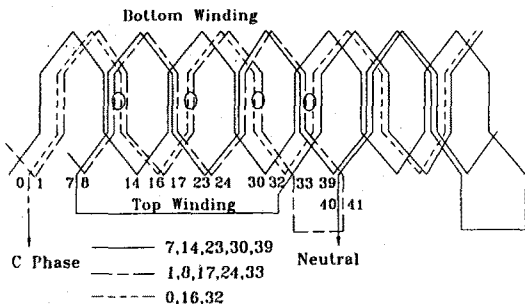


그림 2. 고장자 권선의 C상 회로도 (의암 #2)

측정해 본 결과 45 pF이었다. 그림 3에서 커플러의 출력단에 설치된 SGA (Shield Grounding Assembly)는 신호대 잡음(S/N) 비를 증가시키기 위한 것이다.

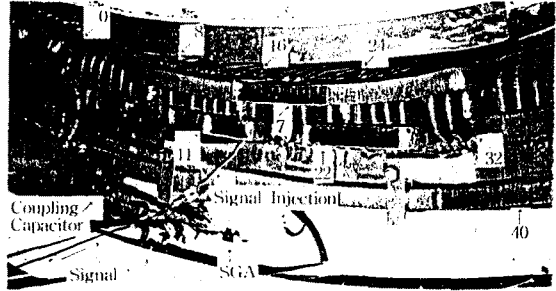


그림 3. 고장자 권선의 실제 배치도 및 신호주입 지점

2-3. 정현파 신호의 전파특성

신호 발생기를 이용해서 그림 3에서 aluminium foil이 부착된 여러 지점의 endwinding에 과고치 10 V, 1~13 MHz의 정현파 신호를 직접 주입하여 용량성 커플러에서의 출력파형을 측정하였다. 그림 4와 그림 5는 0번 권선에 신호를 주입하고, 커플러에서 측정된 출력을 기준으로 endwinding의 여러 지점에서 신호를 주입한 후 측정된 출력을 각각 per unit와 절대값으로 나타낸 것이다. 그림 4에서와 같이 주파수가 1 MHz에서 13 MHz로 증가함에 따라 신호의 전파에 의한 감쇠가 심하다. 1 MHz의 경우 고압부에서 4번째 권선(32번 endwinding)을 통해서 커플러에 도달된 신호는 커플러 단에서 주입된 신호의 60%에 달하나, 10 MHz의 경우는 20%에 불과하다.

또한, 주파수가 증가할수록 Slot내의 권선을 통한 신호의 전파보다는 endwinding간의 용량성 결합(capacitance coupling), 또는 공기중으로의 방사(radiation)에 의해서 신호가 전파됨을 알 수 있다. 따라서 endwinding의 용량성 결합과 공기중 방사에 의해 커플러와 신호 주입지점 사이의 기하학적인 이격거리가 가까워질수록 커플러에서 측정된 신호의 크기가 증가한다.

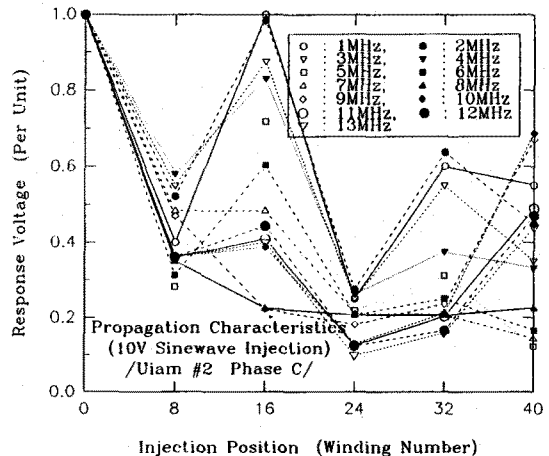


그림 4. 신호주입 지점에 따른 주파수별 전파특성 (per unit)

이것은 10 MHz 신호주입의 예를 들어 다음과 같이 설명될 수 있다. 커플러와 전기적 회로상으로는 C상의 고압부가 아닌 중성점 부근에 연결되어 있는 8번, 24번의 endwinding에서 주입된

신호가 커패시터와의 거리가 멀어짐에 따라 감소되어 나타나며, 40번 중성선에 10 MHz 신호를 주입하였을 때 중성선과 연결된 Ring Bus가 커패시터와 30 Cm 정도 떨어져 통과하고 있기 때문에 Ring Bus를 통한 신호의 방사로 인하여 커패시터에서 측정된 신호의 크기는 커패시터 단자에서 주입된 신호의 70%로 증가되어 나타난다. 40번에서 주입된 신호의 주파수 응답특성이 10 MHz에서 가장 크게 나타나는 것은 그림 1에서와 같이 실험실에서 측정된 커패시터의 주파수 응답특성과 잘 일치한다.

한편, 4 MHz~7 MHz 주파수의 신호를 주입하여 전파된 파형을 측정했을 경우에는 거의 모든 신호가 심하게 왜곡되는 현상이 발견되었다.

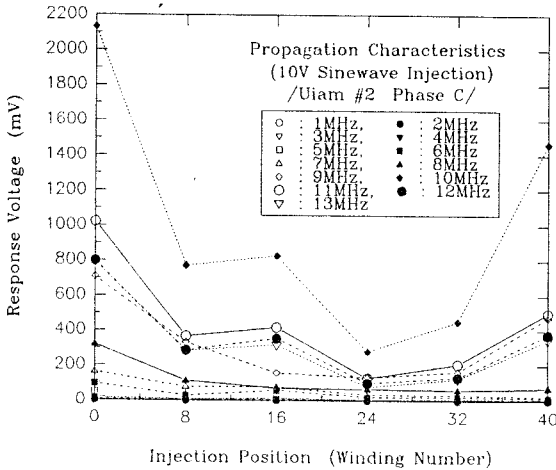


그림 5. 신호주입 지점에 따른 주파수별 전파특성 (절대값)

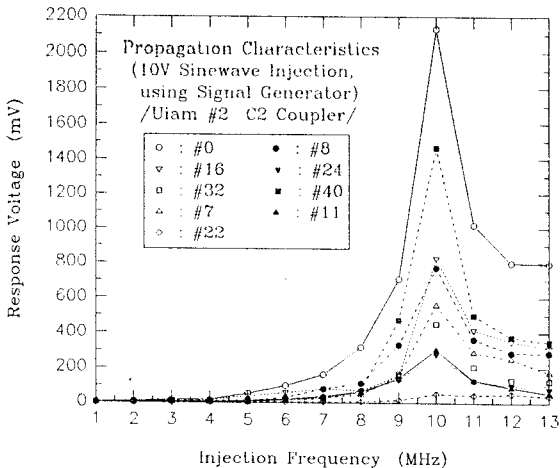


그림 6. 주파수에 따른 신호주입 지점별 응답특성 (절대값)

그림 6은 각각의 endwinding에서 주입된 신호를 커패시터에서 측정할 절대값이며, 커패시터의 주파수 응답특성과 권선의 주파수에 따른 신호의 전송특성을 고려한 총체적 주파수 응답특성으로 10 MHz에서 가장 큰 주파수 응답특성을 나타내었다.

2-4. 펄스 신호의 전파특성

고정자 권선의 절연물을 제거하고 용량성 커패시터 C2가 연결되는 부분의 도체에 펄스 발생기를 이용하여 직접 신호를 주입하고, 6.9 m 떨어진 또다른 커패시터 C1이 연결된 도체 부분과 신호

주입 지점에서 Oscilloscope로 신호의 파형을 측정된 결과를 그림 7에 나타내었다. C2 지점에서 C1 지점까지는 상부스(Phase Bus)로 연결되어 권선과 같은 재질을 절연물로 사용하고 있다. C2에서 측정된 펄스폭은 100 nano-sec 정도이며, C1에서 측정된 파형은 그 폭이 2배 정도 늘어난 200 nano-sec이고, 크기는 60% 정도인 신호가 측정되어 Bus를 따라 신호가 전파됨에 따라 펄스 폭이 커지고 신호가 감쇠되는 전형적인 신호 전파특성을 나타내고 있다.

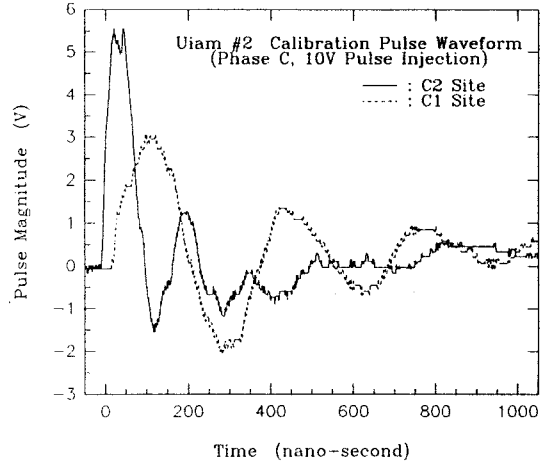


그림 7. C상의 C1, C2에서의 측정파형 (커패시터 사용 안함)

상승시간(rising time)이 실제 부분방전 신호와 유사한 6~8 nano-sec의 펄스 신호를 C상 권선의 고압부인 0, 16, 32번의 top 및 bottom endwinding에 순차적으로 주입하여 커패시터를 통해 전송된 신호를 그림 8과 그림 9에 각각 나타내었다. 그림 8에서 0번 권선의 top endwinding에서 주입된 신호는 그 파고치가 488 mV로 다른 파형에 비해서 상당히 크다. 이것은 주입 및 검출 지점간의 거리가 매우 가까기 때문에 전파시의 감쇠가 미소할 뿐만 아니라 공기중으로의 방사현상의 영향이라고 판단된다. 또한, 16번과 32번 권선에 주입된 신호중 첫번째 파고치도 역시 공기중 방사에 의한 것으로 추정된다.

측정된 파형의 펄스폭을 커패시터에 가까운 권선의 순서로 나열하면 0번 top→bottom, 16번 top→bottom, 32번 top→bottom 권선의 차례이다. 각각의 권선에 모의 부분방전 펄스를 주입하여 커패시터에서 측정된 파형의 펄스폭과 파고치를 표 1에 나타내었다. 32번 bottom endwinding에서 측정된 파형은 심하게 왜곡되어 나타났다. 이는 앞에서 언급한 바와 같이 측정된 펄스의 주파수 대역이 4 MHz~7 MHz이기 때문인 것으로 판단된다.

표 1. 신호주입 지점에 따른 펄스폭 및 파고치

권선 Number	펄스폭 (nano-second)	파고치 (mV)
0번 top	37	488
0번 bottom	37.5	52
16번 top	38	59
16번 bottom	43	26
32번 top	56	22
32번 bottom	82	17

그림 10은 고압부가 아닌 C상으로서 중성선에 가까운 권선인

8, 16, 24번의 endwinding에서, 그림 11은 C상이 아닌 다른 상의 endwinding에서 주입된 신호를 측정한 파형을 각각 나타낸다. 그림 8, 9의 파형과는 다르게 고조파 성분을 많이 포함하여 왜곡되어 나타남을 볼 수 있다. 이것은 Slot내의 권선간, 혹은 end-

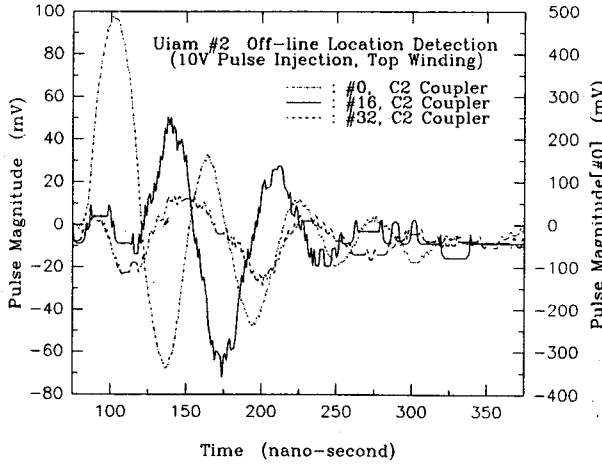


그림 8. Top endwinding에서 주입된 신호의 파형

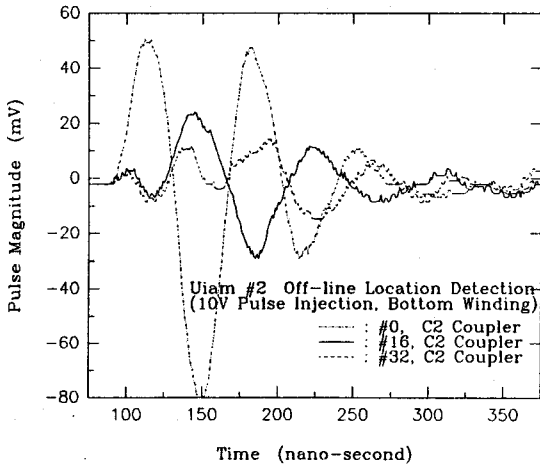


그림 9. Bottom endwinding에서 주입된 신호의 파형

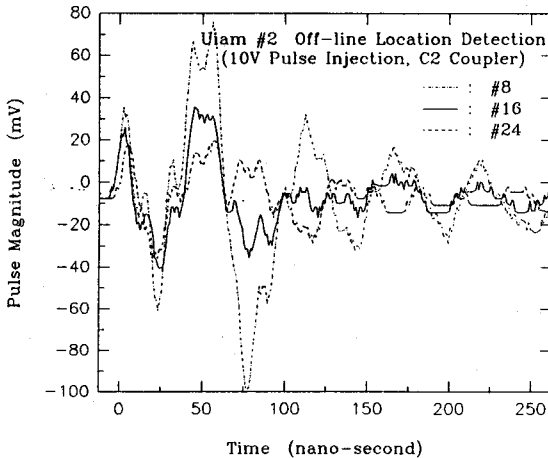


그림 10. 신호주입 지점에 따른 파형 (8, 16, 24번 endwinding)

winding간의 용량성 결합을 통해서 신호가 전달되기 때문인 것으로 판단된다.

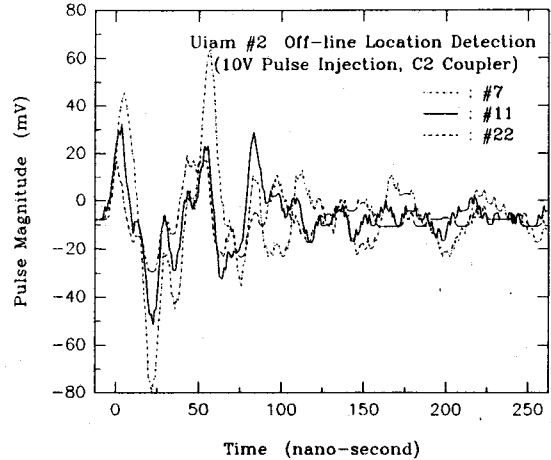


그림 11. 신호주입 지점에 따른 파형 (7, 11, 22번 endwinding)

3. 운전중 위치탐지

이상과 같은 발전기의 정지시에 가변 주파수의 정현파와 모의 부분방전 펄스의 주입에 의해 얻어진 위치탐지 기법을 운전중인 수력 발전기의 고정자 권선에 적용하여 아래와 같이 그 기법의 타당성을 확인하였다. 운전중에 있는 의암 #2 수력 발전기의 고정자 권선에서 발생한 부분방전 신호가 기존에 설치된 커플러의 출력단에서 그림 12와 같이 측정되었다. 그림에서 보는 바와 같이 정지중 모의실험에 의해 측정된 그림 8, 9의 파형과 일치되는 3 가지 유형의 파형이 역시 발견되었다. 파형 (a)는 38 nano-sec, (b)는 46 nano-sec, 그리고 파형 (c)는 76 nano-sec의 펄스 폭을 각각 가지고 있다. 따라서 이 부분방전 신호에 대하여 표 1에 나타난 값을 기준으로 하여 부분방전의 발생위치를 판정하면, (a)는 0번 bottom과 16번 top, (b)는 16번 bottom과 32번 top, 그리고 (c)는 32번 top과 32번 bottom사이의 권선에서 발생한 것으로 추정할 수 있다.

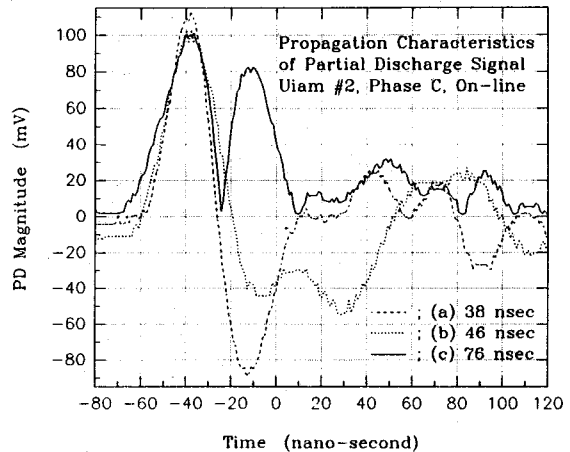


그림 12. 운전중인 발전기에서 측정된 부분방전의 파형

4. 결론

본 논문에서는 수력 발전기 고정자 권선에서의 국부적 손상지점의 위치탐지를 위한 기초적인 연구로서, 발전기가 정지중인 상태에서 주파수에 따른 신호 전파특성과 모의 부분방전 펄스를 이용한 고정자 권선의 전송특성 분석을 수행하여 부분방전이 발생한 지점을 알아내는 방법을 제시하였고, 발전기의 운전중에 발생한 실제 부분방전 파형의 전파특성을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 고정자 권선에서 신호전파에 영향을 주는 요인에는 권선의 구조 및 기하학적인 이격거리에 따른 용량성 커플링과 공기중으로의 방사현상 등이 있다.
- (2) 정현파 신호가 고정자 권선을 따라 전파되면 주파수가 높을수록 신호의 감쇠율이 커진다.
- (3) 정현파 신호주입에 의한 고정자 권선과 용량성 커플러의 종합적인 주파수 특성은 10 MHz의 주파수 대역에서 가장 민감한 측정 감도를 나타내었다.
- (4) 4 MHz~7 MHz의 주파수 대역에서는 커플러의 고유특성으로 인해 파형의 왜곡이 더욱 심하였다.
- (5) 커플러에서 측정된 파형의 펄스폭은 펄스를 주입한 위치와 커플러 사이의 이격거리에 비례하고, 그 크기는 반비례한다.
- (6) 발전기의 운전중에도 고정자 권선에서 발생된 부분방전의 위치를 탐지할 수 있는 가능성을 발견하였다.

참고 문헌

1. A. Wilson, R.J. Jackson, N. Wang, "Discharge Detection Techniques for Stator Windings", IEE Proceedings-B, vol. 132B, pp. 234~244, 1985.
2. J.S. Edmonds, G. Bjorkman, "In-Service Location of Partial Discharge on Hydrogenerators", International Conference on Generator and Motor Partial Discharge Testing, Toronto, Ontario, April 18-19, 1994.
3. A. Grob and H.G. Kranz, "Possibilities of Diagnostic Methods with Different Neural Networks and Fuzzy Sets for PD Measurements", 8th International Symp. on High Voltage Eng., pp. 165~168, August 23-27, 1993.
4. S.R. Campbell, G.C. Stone, H.G. Sedding, "Characteristics of Partial Discharge Pulses from Operating Rotating Machines", 1994 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, June, 1994.
5. H. Zhu, I.J. Kemp, "Pulse Propagation in Rotating Machines and its Relationship to Partial Discharge Measurements", Conf. Record of the 1992 IEEE Int'l Symp. on Electrical Insulation, Baltimore, USA, pp. 411~414, June 7-10, 1992.
6. Q. Su and R.E. James, "Examination of Partial Discharge Propagation in Hydro-Generator Stator Windings using Digital Signal Processing Techniques", UPEC '91, pp. 482~485, 1991.