

발전소 직류전선로의 지락안전진단 시스템에 관한 연구

A Study on the Ground Fault Diagnosis System of Power Station DC Power line

안 영 주*·김 남 호*·이 형 기*

Y. J. An · N. H. Kim · H. K. Lee

(1996년 10월 31일 접수, 1997년 3월 28일 채택)

ABSTRACT

There are two kinds of ground fault diagnosis system(GFD), which are for AC and DC power line. The ground fault current of a DC power line is, first, analyzed for a description of a GFD system for DC power line and then the construction method of the GFD system, which could be processed and analyzed a ground fault current, are explained. Main functions of the system are that the detected ground fault current could be converted to the line insulation resistance by a program and saved in the system memory continuously. Finally a DC power line insulation safety could be decide by a change of the saved insulation resistance for a given time. This system can detect the ground fault resistance to 100KΩ.

1. 서 론

산업의 고도화와 생활수준이 향상됨에 따라 전력을 사용하는 기기 및 장소가 계속적으로 증가되고 있다. 이에 따라 잘못된 전력 사용방법에 의한 사고 외에도 충전된 전로 및 기기의 절연저하에 따라 누전현상에 의한 사고도 증가되어, 산업설비 또는 공공설비와 같은 시설물의 재산적 손실을 가져올 뿐만 아니라 심지어는 감전사고에 의한 인명

의 손상도 초래한다.

일반 저압전선로는 전류가 흐르는 도체와 이를 절연하기 위한 절연물로 구성되어 있다. 초기의 전선로는 절연상태가 양호하지만 시간이 경과함에 따라 점점 절연성능이 저하한다. 절연물의 성능저하는 전력을 공급하는 전선로에 경미한 누전을 일으키며, 더욱 더 절연물의 열화가 진행되면 완전 지락의 상태로 진행된다¹⁾. 완전 지락현상은 정상적인 전력공급을 어렵게 할뿐만 아니라 보다 큰 사

*부경대학교 제어계측공학과

고로 확대될 가능성이 항상 존재하게 된다. 그러므로 이러한 절연열화에 의한 누전현상이나 정전사고를 사전에 예측하고 이를 방지하기 위하여 저압전선로의 절연열화를 측정하는 시스템이 요구되며, 이러한 시스템은 전로가 충전되어 있는 상태에서도 항상 전선로의 절연상태를 감시하는 기능이 요구된다. Ground fault diagnosis(이하 GFD) 시스템은 저압전선로의 절연상태 및 불량개소를 검출하여 지락사고를 사전에 예측하고 방지하기 위한 지표를 지원하는 지락안전진단 시스템이다^{2,3)}.

본 연구에서는 발전소에서 사용되고 있는 저압 직류 전선로의 절연상태를 감시하여 예측 가능한 사고를 사전에 진단할 수 있는 GFD 시스템에 대하여 고려했다. 먼저 비접지식 직류 전선로의 지락기구를 규명하고, 이런 지락기구를 통한 지락전류의 검출과 검출된 지락전류를 해석한다. 해석한 방법을 바탕으로 모의 전선로의 절연저항을 시험 측정하고 그 결과를 검토한다. 그리고 이러한 방법에 기준하여 지락안전진단 시스템을 구성하였다.

2. 지락전류와 절연저항

저압전선로에서 절연물과 전력을 사용하고 있는 기기들은 주위의 분위기에 의한 오손 및 외부의 기계적인 충격에 의하여 절연 성능이 저하되며, 이는 온도에 의한 열화, 흡습에 의한 열화, 먼지에 의한 열화, 절연물 내부의 보이드(void)에 의한 크랙(crack) 및 경년변화에 의한 자연열화 등으로 분류할 수 있다.

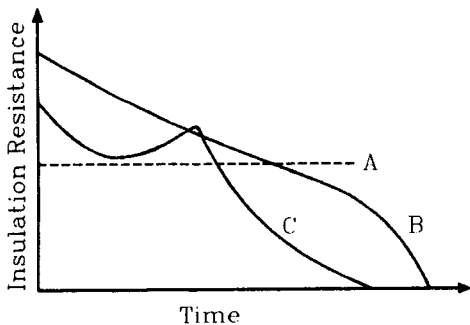


Fig. 1 Aging characteristics of insulation deterioration

Fig. 1은 일반적인 절연물의 절연열화특성을 나

타내는 곡선으로서 사용 기간에 대한 절연물의 절연저항값 변화를 나타낸 것이다. Fig. 1에서 점선으로 표시된 직선 A는 이상적인 절연물의 경우로서 시간이 경과하여도 절연저항값이 거의 일정하게 유지되고 있다. 그러나 보통 사용되고 있는 절연물들은 단기간 내의 절연저항값은 거의 일정한 값으로 유지되지만 시간이 흐름에 따라 서서히 열화되어 절연저항값이 차츰 감소하게 된다. 곡선 B는 이러한 일반적인 절연물의 절연저항에 대한 경년변화를 나타낸 것이며, 시간이 경과함에 따라 절연저항이 점점 감소하여 결국에는 절연파괴를 일으키는 것을 알 수 있다. 곡선 C는 충격전압 또는 이상전압에 의해 급격히 절연성능이 저하되어 절연파괴되는 현상을 나타내고 있다.

전선로와 대지사이에 절연저항은 누설콘덕턴스로 작용하고 또한 정전용량도 존재하기 때문에 전선로가 건전한 상태일지라도 항상 누설전류가 흐르게 되며, 누설전류가 대지를 통하여 흐르므로 이를 지락전류라고도 한다. 그러나 전선로를 절연하는 절연물이 정상일 경우에는 이러한 누설전류의 크기가 아주 미소하기 때문에 무시한다.

본 연구에서는 항상 전선로에 인가된 전압을 사용하여 누설전류를 검출하고 누설전류의 크기를 절연저항으로 환산하여 절연열화정도를 판단하는 지표로 한다.

2.1 직류전선로의 지락전류 해석

Fig. 2는 비접지식 직류전선로에 지락사고가 발생하였을 경우의 등가회로이며, 중심저항 R_0 는 지락사고 발생시 접지전류를 검출하기 위해 사용하는 저항이다. 합성지락전류 I_g 는 저항성 전류 I_r 과 용량성 전류 I_c 의 벡터합으로 표현되며, Fig. 3에 이들 벡터도를 나타내었다.

여기서,

E_A : R_g 를 변화시켰을 경우 등가 정현파 대지전위 (지락신호원)

R_0 : 중심점 저항(지락전류 발생회로용 저항)

R_g : 접지 가변저항(트랜지스터 또는 수은 릴레이에 의한 신호발생용 등가저항)

C_0 : 직류회로의 합성 대지 정전용량

R_c : 등가 지락저항

C_c : 전선로의 정전용량

등가회로 Fig. 2(b)로부터 합성 지락전류를 구

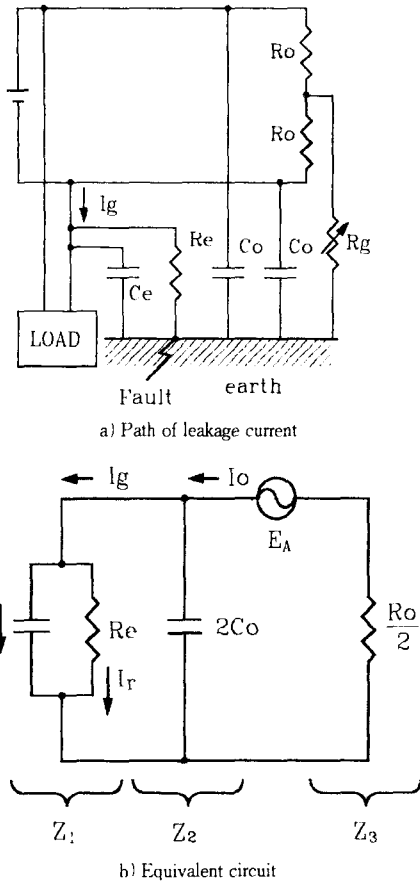


Fig. 2 Equivalent circuit of ground fault in DC feeder

하면 식 (2)와 같다.

$$\dot{I}_o = \frac{\dot{E}_A}{(Z_1 \cdot Z_2 / Z_1 + Z_2) + Z_3} = \frac{(Z_1 + Z_2) \dot{E}_A}{Z_1 \cdot Z_2 + Z_1 \cdot Z_3 + Z_2 \cdot Z_3} \quad (1)$$

$$\dot{I}_g = \dot{I}_o \cdot \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} = Z_2 \frac{\dot{E}_A}{Z_1 \cdot Z_2 + Z_1 \cdot Z_3 + Z_2 \cdot Z_3} \quad (2)$$

단, $Z_1 = \frac{R_e}{j\omega C_e R_e}$, $Z_2 = \frac{1}{j2\omega C_o}$, $Z_3 = \frac{R_o}{2} + R_g$

또한, Fig. 3으로부터 직류전선로의 지락전류에는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\dot{I}_g = \dot{I}_r + j\dot{I}_c$$

$$I_r = I_g \cos \theta, \quad I_c = I_g \sin \theta \quad \dots \dots \dots (3)$$

그러므로 검출기를 사용하여 지락전류 I_g 크기 및 등가 지락신호원과의 위상차 θ 를 측정하고, 식(3)의 관계를 사용하여 저항성분 전류와 용량성

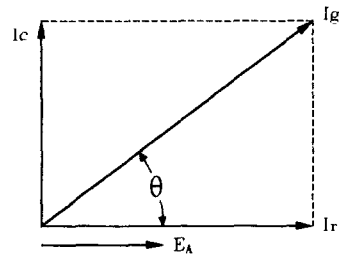


Fig. 3 Vector diagram of a earth leakage current

분 전류를 계산한다. 이들 전류에서 저항성분 전류 I_r 이 순수 지락전류가 되며, 이로부터 직류전선로에 대한 절연저항값을 산출할 수 있다.

3. 지락안전 진단 시스템의 구성

지락안전진단 시스템은 지락전류 신호발생부, 지락전류 검출기, 지락전류 신호변환부 및 주컴퓨터로 구성되며, 전체 구성도를 Fig. 4에 나타내었다. 주컴퓨터는 지락전류 신호변환부로부터 받은 측정데이터로부터 전체 감시시스템의 지락전류 검출기의 자료를 분석하고, 이상이 발생할 경우 경보출력을 위한 신호를 발생한다. 또한 장기간의 절연 진단을 위해 측정된 데이터를 일정 시간별, 기간별로 기록 보관하는 기능도 갖고 있다. 나머지 각 부분에 대하여는 다음과 같다.

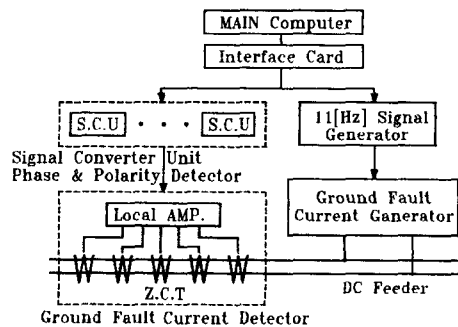


Fig. 4 Structure of the ground fault diagnosis system

3.1 지락전류 신호 발생부

Fig. 5는 지락전류 신호발생회로의 구성을 나타낸 것이다. 직류전선로에서 지락이 발생할 때 지락전류를 검출하기 위하여 그림과 같이 2개의 저항을 직류전선로의 (+)측과 (-)측에 연결하고,

그 중앙 단자에 다이오드 브릿지 회로를 연결한다. 외부에서 공급하는 11Hz의 구동신호에 의해 트랜지스터 Q가 on, off 되며, 지락이 발생되었을 경우에만 폐회로가 구성되어 트랜지스터의 콜렉터측에 전류가 흐른다. 그러므로 전선로에 연속적인 지락이 발생하였을 경우 트랜지스터의 동작 때문에 지락전류는 11Hz를 기본주파수로 하는 교류전류가 되므로 영상변류기(ZCT, zero phase current transformer)를 사용하여 지락전류를 검출하는 것이 가능하다.

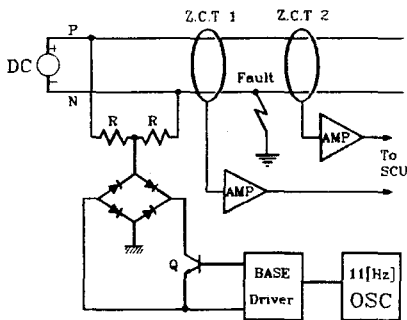


Fig. 5 Ground fault current source generator

만일 영상변류기 ZCT1과 ZCT2 사이에 지락이 발생하면 ZCT1에는 지락전류가 검출되지만 ZCT2에는 검출되지 않는다. 따라서 지락점의 위치는 ZCT1과 ZCT2 사이에 있는 것으로 판단할 수 있다. 또한 지락이 발생되어야만 폐회로가 구성되어 전류가 흐르기 때문에 지락이 발생하기 전에는 직류회로에 아무런 영향을 미치지 않는다.

3.2 지락전류 검출기

지락전류 검출기는 11Hz의 영상전류를 검출하는 영상변류기와 증폭기로 구성된다. 영상변류기는 철심과 2차권선으로 이루어져 있으며, 철심구조는 환형이 많고, 철심은 여자전류를 작게하기 위하여 양질의 방향성 규소강대 또는 퍼멀로이(철과 니켈의 합금) 등의 고투자율 자성재료를 사용한다. 영상변류기의 출력은 아주 미소한 값이므로 그대로 사용하기에는 부적절하므로 영상변류기의 출력신호에 연산증폭기를 이용한 비반전 증폭회로를 사용하여 영상전류신호로 이용한다.

Fig. 6은 본 연구에 사용한 지락전류 검출기의 특성을 측정된 것이며, 자성재료로는 퍼멀로이 코

어를 사용하였다. Fig. 6은 지락전류에 대한 검출기의 출력전압을 측정된 것으로, 지락전류의 크기가 약 15mA 범위까지는 거의 직선적으로 검출된다. 그러나 검출기에 사용된 연산증폭기의 출력전압에 제한이 있고 또한 미소전류 검출에 주안점을 두기 때문에 더 이상의 전류범위까지 측정을 해야 할 필요는 없다.

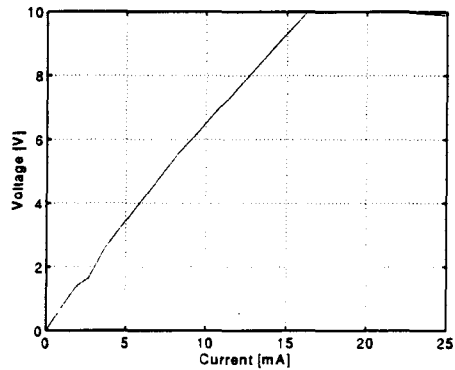


Fig. 6 Characteristics of the permalloy core current sensor

3.3 지락전류 신호변환 증폭회로, 위상측정 및 극성판별회로

지락검출센서에서 검출된 지락전류는 전압으로 변환되어 지락전류 신호변환카드에 입력된다. 지락전류 신호변환기의 구성을 Fig. 7에 나타내었다.

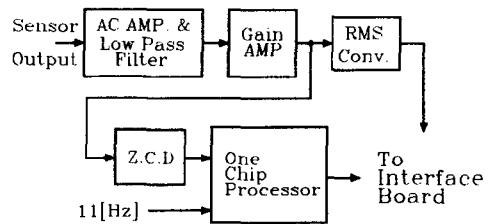


Fig. 7 Block diagram of the signal converter unit

검출센서에서 검출된 지락전류파형과 직류전압(또는 offset전압)이 함께 변환회로에 인가된다. 입력신호전압을 교류증폭기를 사용하여 교류분만 얻어내고, 다음에 chebyshev 3차 2단 저역필터회로에 인가하여 11Hz의 지락성분만 통과시킨다. 필터링된 신호는 이득증폭회로를 거쳐 실효값 변환회로에 의해 지락전류 실효값으로 변환되고, 절연저

항 계산시의 지락전류값으로 사용된다.

극성 및 위상 측정회로는 검출된 지락전류와 기준 신호인 11Hz 동기신호를 이용하여 어떤 극성의 선로가 지락이 되었는지를 판별하며, 또한 위상 관계를 알아내어 순수 저항성분에 해당하는 지락전류 실효값을 계산하는데 사용한다. 동기신호의 positive edge를 검출하여 동기펄스의 반주기를 45,454등분하고 마이크로 컨트롤러를 사용하여 프로그램에 의해 위상각과 극성을 측정하였다.

4. 실험 및 고찰

Fig. 4에서 나타난 지락안전진단 시스템을 설계 제작하여 지락이 발생하였을 경우의 특성을 실험을 통하여 고찰하였다.

4.1 신호 변환 유닛

Fig. 8(a), (b)는 신호변환 유닛에서 지락발생시 11Hz의 동기펄스와 지락전류를 측정된 것이다. (a)는 지락전류 검출기의 출력 파형이며, (b)는 지락저항이 5KΩ이고 대지간 등가정전용량을 7.7 μF로 할 경우 저항성 지락전류와 용량성 지락전류의 합성 지락전류이다. 그림에서 (a)의 지락전류는 순수한 저항성분이므로 동기펄스와 지락검출전류는 거의 동위상을 보이고 있으며, (b)는 저항과 대지간의 정전용량이 지락되었을 경우로 지락전류에는 저항성분에 용량성분이 합성되어 동기펄스보다 전류위상이 앞서고 있음을 나타내고 있다.

Fig. 8(b)에서 지락전류 실효값 I_e 는 4.87V이며, 위상각 θ 는 약 52deg이다. 그러므로 식(3)에 의해 저항성분과 용량성분 전류는 각각 $I_r=2.998V$, $I_c=3.84V$ 로 계산된다. Fig. 8(a)에서 지락전류의 실효값이 $I_g=2.988V$ 이므로 Fig. 8(b)에서 계산된 저항성분 전류 I_r 과 일치되는 것을 알 수 있다.

4.2 극성 판별 및 위상 측정회로

극성 판별 및 위상 측정회로는 지락이 발생한 전선로의 극성을 판별하고, 또한 검출전류로부터 동기신호와 비교하여 위상관계를 측정하는 회로이다. Fig. 9는 극성 판별을 위해 지락 검출전류를 파형정형하여 동기신호와 함께 나타낸 것이며, 위

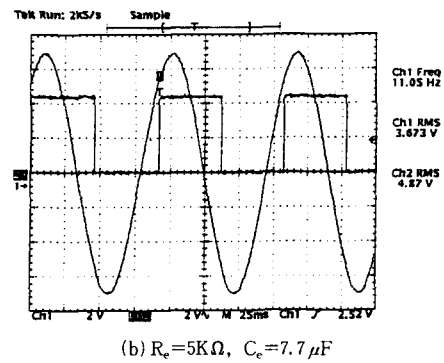
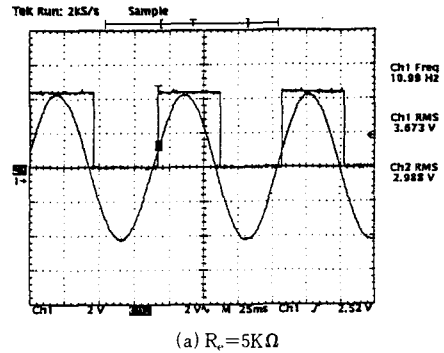


Fig. 8 Waveforms of a ground fault current

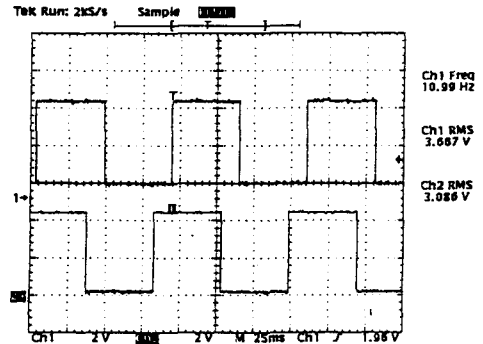


Fig. 9 Waveform of the phase detector circuit

쪽은 동기신호, 아래쪽은 지락검출전류의 정형된 파형이다. 그림에서 동기신호의 positive edge에서 볼 때 지락전류의 크기는 양(+)의 값이다. 따라서 (+)극의 전선로에서 지락이 발생한 것을 알 수 있으며, 만약 (-)극에서 지락이 발생하면 지락검출전류의 정형된 파형은 반전된다.

또한 동기펄스의 반주기를 45,454등분하고, 윈칩마이크로컴퓨터를 사용하여 프로그램에 의해 위

상각과 극성을 측정하였다. 검출된 지락전류의 크기, 위상 및 극성들을 주컴퓨터에서 취합하여 해당하는 직류전선로에 흐르는 순수 지락전류를 계산하고, 이에 대응하는 절연저항을 산출한다.

4.3 지락 발생시의 신호변환회로의 측정

지락저항이 각각 600Ω, 100KΩ일 때의 신호변환부의 파형을 측정하고, 이를 Fig. 10, 11에 나타내었다. 여기서 100KΩ 저항값은 휴대용 절연저항 측정기의 최소 눈금단위이며, 이하의 값은 판독이 곤란하다. 또한 100KΩ이상의 높은 절연저항일 경우는 누설전류가 미미하여 검출이 곤란하므로 100KΩ을 시스템이 측정가능한 최대 절연저항으로 설정하였다.

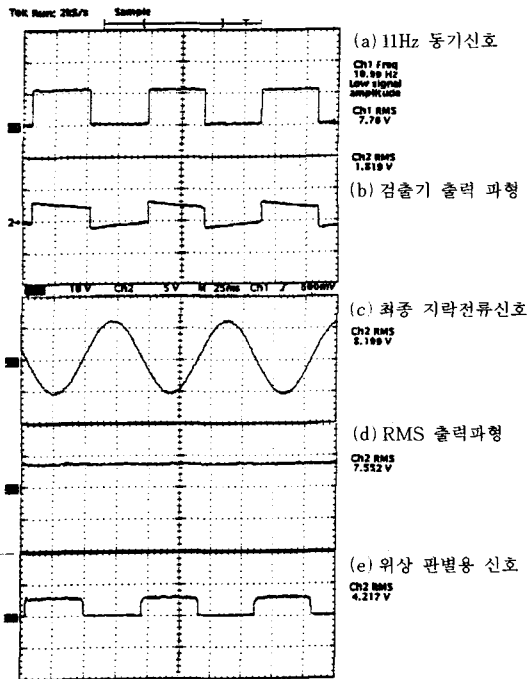


Fig. 10 Waveform in SCU [$R_0=600\Omega$]

Fig. 10, 11의 (a)는 11Hz 동기신호이며, (b)는 검출기의 출력전압이다. Fig. 10, 11의 (b)에서 검출기의 출력전압은 11Hz 교류신호에 직류전압이 중첩된 것을 알 수 있다. 이 신호에서 직류전압을 제거하고, chebyshev 3차 필터로 필터링한 다음 이득증폭회로를 거쳐서 증폭한 파형이 그림(c)이다. 이 신호는 실효값 변환기를 거쳐서 그림(d)와

같은 직류전압을 출력한다. 이때 지락저항이 600Ω인 경우 지락전류의 실효값은 7.552V이며, 100KΩ 지락저항에서는 30.64mV이다. 최대전압 10V를 측정하는 12bit A/D 변환기의 1bit은 2.44mV에 해당하므로 12bit의 A/D 변환기를 사용하면 지락저항 100KΩ까지의 지락전류 측정이 가능하다.

Fig. 10, 11의 (e)는 지락전류의 극성과 위상 판별을 위해 정형한 신호이다.

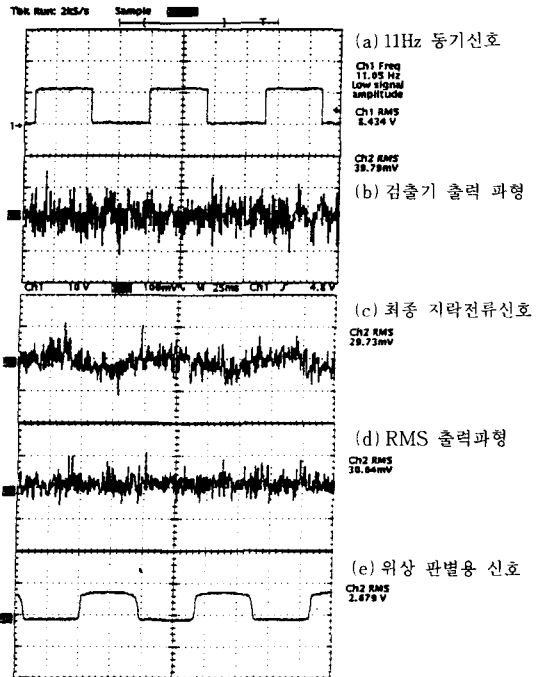


Fig. 11 Waveform in SCU [$R_0=100K\Omega$]

5. 결 론

발전소 내의 동작 신뢰를 위해 사용되는 직류 급전방식에 있어서 신뢰성을 높이기 위한 일환으로 직류 전선로의 지락안전진단 시스템을 구성하고 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 구성한 지락전류 검출방법은 통전된 상태에서 11Hz의 낮은 주파수로 안정한 지락전류 검출을 가능하게 한다.
- 2) 검출된 지락전류에 위상측정회로를 이용하여 순수한 저항성분 지락전류의 산출 및 지락지점의 극성판별이 가능하다.

3) 지락 안전 진단을 위한 절연저항 검출은 최대 100K Ω 정도이다.

제시된 지락안전진단 시스템은 통전된 상태에서 연속적인 전선로의 절연저항 감시가 가능하여 전선로의 신뢰성을 확보함은 물론 발전소 전체의 신뢰성을 증가시키는데 역할을 할 것이다. 또한 저압 교류전선로에도 이러한 상시 지락안전진단 시스템의 적용이 연구되어야 하겠다.

참 고 문 헌

- 1) 김종훈, 최길수, “누설전류 측정에 의한 절연 열화 분석 연구”, 한국전기안전공사, pp. 111 ~113, 1992.
- 2) 四郎丸功, 直流電路地絡檢出裝置の發展と實用化, 火力原子力發電, Vol. 31, No. 2, 1980.
- 3) Bender, Ground Fault Protection Equipment & Low Voltage Protective Relays Manual.