

위상면궤적을 이용한 전력계통의 고장관별에 관한 연구

論 文
51A-5-1

A Study on the Classification of Arcing Faults in Power Systems using Phase Plane Trajectory Method

朴南沃* · 申榮澈** · 安相泌*** · 呂相敏§ · 金喆煥§§

(Nam-Ok Park · Young-Chul Shin · Shang-Pil Ahn · Shang-Min Yeo · Chul-Hwan Kim)

Abstract - Recently, there is greater demand for stable supply of electric power as higher level of our living. It becomes the important problem that the cause of fault in power system is found out in early stage, if once it occurs. In this respect, accurate classification of arcing faults in power systems is vitally important. This paper presents a new classification method for arcing faults in power system. To obtain data of various faults including high impedance fault(HIF) and low impedance fault(LIF), HIF model with the ZnO arrester is adopted and implemented within the overall transmission system model based on the electromagnetic transients program(EMTP). Results of phase plane trajectory with Clarke modal transformation using postfault current and voltage are utilized to classify types of arcing faults. The performance of the proposed method is tested on a typical 154 kV korean transmission system under various fault conditions. As can be seen from results, phase plane trajectory of postfault current should be combined with that of α component from Clarke modal transformation to give reliability of clear fault classification. Thus the proposed method can classify arcing faults including LIFs and HIFs accurately in power systems.

Key Words : High Impedance Fault(HIF), Phase Plane Trajectory Method, Clarke Modal Transformation, Fault Classification

1. 서 론

산업발전에 따른 전력수요의 증가로 우리나라 전력계통은 급속히 확대되어 왔으며, 국가 경제규모가 커짐에 따라 소득 규모도 증대되어 생활수준이 높아지면서 보다 안정적이며 고품질의 전력을 공급받으려는 욕구가 확산되고 있다. 이러한 관점에서 보호계전 시스템의 고장검출 및 고장종류를 판별하기 위한 보호계전 시스템 구성에 대한 다양한 연구가 진행되어 왔으며 또한 많은 발전을 이룩하였다. 그럼에도 불구하고 전력계통의 안정운전 및 고품질의 전기공급에 대한 요구는 날로 증대되어 종전에는 그 중요성이 그리 크지 않거나 단순히 어떤 고장형태에 삽입하여 검출함으로써 대처가 가능하였던 고장판별 범위가 날로 세분화되고 있다. 따라서, 이에 효과적으로 대처할 수 있는 보호계전기술의 필요성과 관련분야의 끊임없는 연구개발이 촉구되고 있다.

특히, 고저항 지락사고의 경우 전체사고의 20% 정도를 점유하고 있으나, 고저항 지락사고의 아크 발생특성 및 고장상황에 따른 다양한 전류의 형태 및 크기 때문에 이의 검출 및 보호방안이 쉽지 않고, 고저항 지락사고의 피해 또한 적지 않다[1].

따라서, 전력계통에 사고가 발생할 경우 고장형태를 정확히 판별하여 조기에 고장점을 분리할 수 있도록 보호계전시스템에 정보를 제공할 필요성이 있다. 전력계통 사고시의 전압파형, 전류파형으로 고장형태를 판별하는 방법으로는 고조파 해석을 중심으로 하는 방법, 파형율을 취급하는 방법 등 지금까지 몇 가지가 보고되어 있으며, 현재도 연구가 계속 진행되고 있다 [2-5]. 특히, 고조파해석에 의한 고장형태 판별의 경우 먼저 전류파형을 구별하고, 다음 단계로 전류에 포함된 고조파 함유율의 총화로부터 고장형태를 규명하고, 그 다음의 단계에서는 전압에 의한 보정을 수행함으로써 사고원인을 판별하고 있다. 이 고조파 해석방법은 파형과 사고원인과의 관계에 대한 해석이 어느 정도 가능하나, 첫단계에서의 파형 분류 및 고조파 함유율에 대한 고유특성 판별이 곤란한 점이 있다[4,5].

본 논문은 지금까지의 고조파 해석방법과는 다른 새로운 파형해석방법으로서 비선형제어계의 해석방법의 하나인 위상면궤적에 의한 방법[6,7]을 전력계통의 고장판별에 적용하여 제시하였다. 이러한 위상면궤적을 이용한 방법은 사고파형을 객관적으로 분류, 판별하는 것이 가능하다. 아울러, 효율적이고 분명한 고장판별을 위해 Modal 변환을 추가로 도입하였으며[8-10], Clarke법의 α, β, α 성분을 이용한 위상면궤적 고장판별기법을 제안하였다.

또한, 고저항을 포함한 전력계통의 고장현상을 EMTP를 이용하여 모의함으로써 실제상황과 근접한 자료를 얻을 수 있었으며[11], 위상면궤적 분석방법에 α, β, α 변환방법을 새롭게 접목시켜 모형화함으로써 단락 및 저저항 지락고장과 고저항 지락고장의 검출을 보다 명확히 할 수 있음을 결론으로 도출하였다.

* 正 會 員 : 韓國電氣研究院 電氣試驗研究所 檢受試驗室長

** 準 會 員 : 成均館大 情報通信工學部 · 碩士

*** 正 會 員 : 韓國電氣研究院 電氣試驗研究所 · 工碩

§ 正 會 員 : 成均館大 情報通信工學部 博士課程

§§ 正 會 員 : 成均館大 情報通信工學部 教授 · 工博

明知大 次世代電力技術研究센터

接受日字 : 2001年 4月 11日

最終完了 : 2002年 4月 2日

2. 위상면궤적 이론

전력계통에 발생하는 고장 전압 및 전류는 비선형성의 특성을 가진다. 이 비선형성은 고유의 특이성을 가지고 있으며, 특히 리미트 사이클(limit cycle), 히스테리시스(hysteresis), 도약공진 및 분수주파발생 등의 성질을 나타낸다. 이러한 비선형계를 해석하기 위해 여러 가지 해석법이 사용되는데, 이 모든 해석법의 적용은 비선형성의 정도와 고찰하고 있는 계통의 차수에 의해 크게 좌우된다. 또한, 비선형계의 해석은 리미트 사이클(limit cycle), 히스테리시스(hysteresis), 도약공진 및 분수주파발생의 여부와 그 영향 정도뿐만 아니라 특유의 입력함수에 대한 응답이 결정되어야 한다. 그런데, 비선형계의 해석에서 가장 어려운 점은 일반적으로 어느 하나의 해석법이 모든 문제에 적용될 수 없다는 것이다. 그러므로, 비선형계를 해석하는 방법은 비선형성이 가지고 있는 특성에 따라 나누어 질 수 있고, 이들 방법을 열거하면 다음과 같다. 위상면궤적법(phase plane trajectory method)은 2차 비선형계의 응답을 해석하는데 매우 유익한 방법이고, Liapunov 안정도법은 에너지 개념의 일반화에 근거를 둔 비선형계의 정상 안정도를 결정하는데 매우 유력한 해석법이다. 또한, Popov 방법은 시간-변수 비선형계의 안정도를 결정하는데 매우 유익하다. 일반원주 판별법(generalized circle criterion)은 일반적으로 선형부분이 반드시 페루우프 안정일 필요가 없는 시가변 비선형계에 적용할 수 있다.

계통의 고장분석을 위해서 최근 적용이 시도되고 있는 위상면궤적법은 계통의 고장결과 발생하는 전압 및 전류의 비선형성을 상태-공간 해법으로 적용되고 있는 위상면법에 도입한 것이다[6,7]. 이 위상면법은 비선형계의 과도응답을 해석하거나 또는 초기조건 문제를 푸는데 사용된다. 즉, 변위 x의 변화는 위상면(phase plane)으로 알려진 도면 위에 속도 dx/dt에 대하여 그려지며, 특정한 입력에 대한 궤선을 궤적(trajecory)라 한다. 특정한 변위 대 속도의 궤선군은 여러 계단진폭에 대하여 반복되며 같은 위상면에 그려지는데 이것을 위상도(phase portrait)라 부른다. 궤적의 시발점은 초기 변위 x(0)와 속도 dx/dt(0)이다. 궤적이 초기 시발점을 출발한 후 궤적의 다음 경로는 어떤 계단 입력에 대한 동작을 나타낸다.

위상면을 작성하는 방법에는 해석적 해법으로서 미분방정식의 직접 해법과 2차 미분방정식의 1차 미분방정식으로서의 변환방법이 있으며, 도시적 해법으로는 등경사법이 있다. 미분방정식에 의한 직접해법은 위상도를 그리기 위한 가장 직접적인 방법이지만 실제적인 용도에서는 가장 많이 쓰이지 않는 방법이다. 왜냐하면 미분방정식은 적분 가능한 어떤 해에 대해서는 위상면 표시에 의존할 필요가 없기 때문이다. 2차 미분방정식의 1차 미분방정식으로서의 변환방법은 위상변수로 표시된 새로운 미분방정식을 구성하고, 이 방정식에서 위상도를 직접 얻는 방법이다. 등경사법은 위상도를 결정하기 위한 도시적 방법의 하나이다. 이 방법은 미분방정식이 해석적으로 풀이될 수 없을 때도 사용될 수 있으며, 위의 세 가지 방법 중 가장 유용한 방법이다. 따라서, 전력계통의 고장 전압 및 전류를 해석하는데 가장 적합한 방법이기도 하다.

전력계통의 정상상태시 1상의 전류 또는 전압 상태를 나타내는 sine 파형, 즉 선형 2차 비제동 파형을 등경사법에 따라 위상면궤적으로 그려보면, 다음 그림 1과 같이 나타난다.

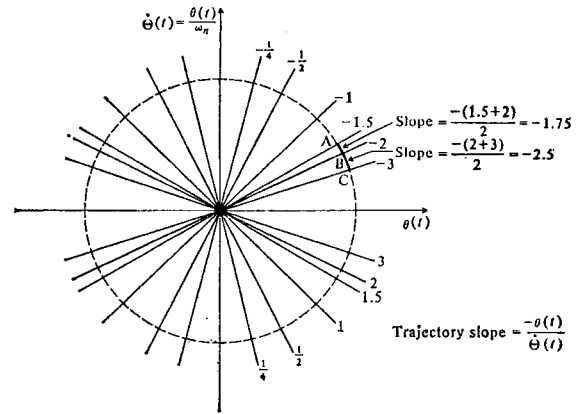


그림 1 등경사법에 의한 sine 파형의 위상면궤적
Fig. 1 Phase plane trajectory of sine waveform using equivalent gradient method

전력계통의 정상상태를 나타내는 sine 파형은 식 (1)과 같이 정의될 수 있으며, 규준화된 위상평면의 횡축은 $\theta(t) [= X]$, 종축은 횡축값의 미분값인 $dx/dt [= (1/\omega)\theta \cdot]$ 로 표현되며, 식 (1)을 $\theta(t)$ 에 대하여 표현하면 식(2)와 같으며, dot 기호를 사용하면 식 (3)과 같다.

$$X = R \sin(\omega T + \psi) = \theta(t) \tag{1}$$

$$\frac{d^2\theta(t)}{dt^2} + \omega^2 \theta(t) = 0 \tag{2}$$

$$\ddot{\theta} + \omega^2 \theta = 0 \tag{3}$$

상태변수를 각각 다음 식(4), (5)와 같이 정의하면

$$x_1 = \theta(t) \tag{4}$$

$$x_2 = \dot{\theta}(t) \tag{5}$$

즉, x_1, x_2 는 다음 식 (6), (7)과 같다.

$$\dot{x}_1 = x_2 \tag{6}$$

$$\dot{x}_2 = -\omega^2 x_1 \tag{7}$$

식 (7)을 식 (6)으로 나누면 다음 식 (8)이 얻어진다.

$$\frac{dx_2}{dx_1} = -\frac{\omega^2 x_1}{x_2} \tag{8}$$

이때,

$$\dot{\theta}(t) = \dot{\theta}(t)/\omega \tag{9}$$

라 하면, 다음 식 (10)을 얻을 수 있다.

$$\frac{d\theta(t)}{d\theta(t)} = -\frac{\theta(t)}{\theta(t)} = m \quad (10)$$

여기서, m은 궤적의 기울기를 표시한다.

식 (10)에 대응하는 기울기와 일치된 등경사법은 원점을 지나는 직선 군을 이루며, -1.5의 기울기에 대응하는 등경사선 위에 있는 어떤 점에서 시작되는 위상면궤적의 작도는 기울기 -1.5의 등경사선 위의 점 a에서 기울기 -2인 등경사선까지 그려지고, 선분 a, b는 그림 1의 두 등경사선의 평균인 -1.75 기울기의 궤적을 그리게 되며, 기울기 -2.5인 다음 궤적 b, c를 연속적으로 그리게 되어 원점을 중심으로 하는 궤적을 형성하게 된다.

즉, 위상면궤적이란 횡축에 시간 t를 포함하는 변수 x를 취하고, 종축에 그 함수의 1차미분 dx/dt를 취하는 위상면상에서 초기상태로부터 출발하는 궤적을 그리는 방법을 말하며, 전력계통에서 1상의 정상상태를 나타내는 sine 파형 형태의 경우 그림 2(a)와 같이 원형을 나타내고, 감쇄진동의 경우는 그림 2(b)와 같이 원점을 향하는 달팽이 모양의 형태를 띄게 되며, 삼각파의 경우는 그림 2(c)와 같은 사다리꼴 형태의 궤적을 나타내며, 태형파의 경우 그림 2(d)와 같이 삼각파의 경우와 유사한 위상궤적을 그리게 됨을 알 수 있다. 따라서, 전력계통의 고장파형을 위상면궤적으로 분석할 경우 여러 가지의 고장형태가 시각적으로 판별이 가능함을 증명하고 있다.

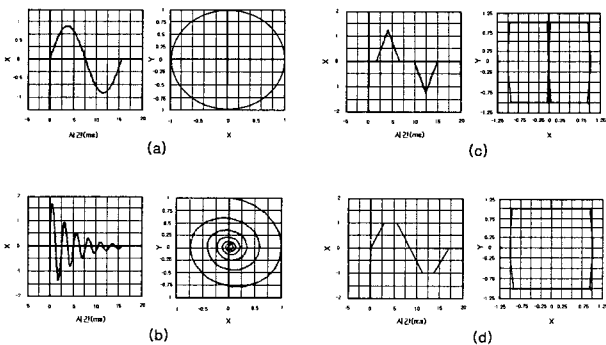


그림 2 다양한 입력파형에 대한 위상면궤적
Fig. 2 Phase plane trajectory of various input waveform

3. 위상면궤적을 이용한 고장판별

3.1 고장판별을 위한 위상면궤적 적용 방법

전력계통의 각종 단락 및 지락고장 파형을 자동제어공학에서의 비선형제어계의 해석수법의 하나인 위상면궤적으로 분석할 경우 객관적으로 고장상태를 분류, 판별하는 것이 가능하다. 또한, 어느 임의의 파형을 위상궤적으로 묘사할 경우 시간축의 분할, 즉, 샘플링 시간 간격에 따라서 위상면상의 형태가 다르며, 위상면궤적은 샘플링 간격을 길게 하면 거친 형상으로 되며, 역으로 짧게 통과하면 불필요하게 복잡하게 된다. 따라서, 위상면궤적을 이용한 파형 판별이란 관점에서 본래의 파형 특성을 잃지 않고 판별하기 쉬운 적절한 샘플링

간격을 결정할 필요가 있으며, 고장에 의한 전압 및 전류의 크기가 전력계통의 여건에 따라 다르게 나타나므로 정규화할 필요가 있다.

① 샘플링 간격

일본의 경우 배전용 변전소에 설치되어 있는 관측용 측정기는 수 종류가 있고 더구나 샘플링 간격은 같지 않기 때문에 측정기로 기록되어진 파형 데이터를 등분화하고 재시정함으로써 위상면궤적을 그리는 방법을 사용하여, 관측된 지락사고 파형 중에서 최단시간에 변동이 큰 고장 데이터를 대상으로 여러 가지 샘플링 간격에 따른 영향을 분석한 바 있다[6]. 분석결과를 그림 3에 표시하면, 그림 3(a)는 전체 1선 지락전류 파형을 나타내는데, 그림 3(b)는 샘플링 간격을 0.01 ms로 하고 1 cycle을 그린 것이며, 그림 3(c)는 0.1 ms, 그림 3(d)는 0.125 ms, 그림 3(e)는 0.2 ms로 샘플링 간격을 변화시켜 파형을 확대 표시하였다. 실제 파형의 특성은 시간축 1.5 ms에서 2.0 ms 사이의 두 개의 피크가 있는 곳에서는 진동이 심하고 전류값이 0 레벨부근에서 작게 진동하는 특징이 있다. 이때 그림 3(b)와 그림 3(c)는 이러한 특징이 잘 표시되어 있는 데 반하여, 그림 3(d)와 그림 3(e)에서는 피크부분의 데이터가 소실되어 완만한 파형을 그리고 있다. 따라서, 본문에서 수행된 고장상태 분석에서도 같은 샘플링 주기를 적용하였다.

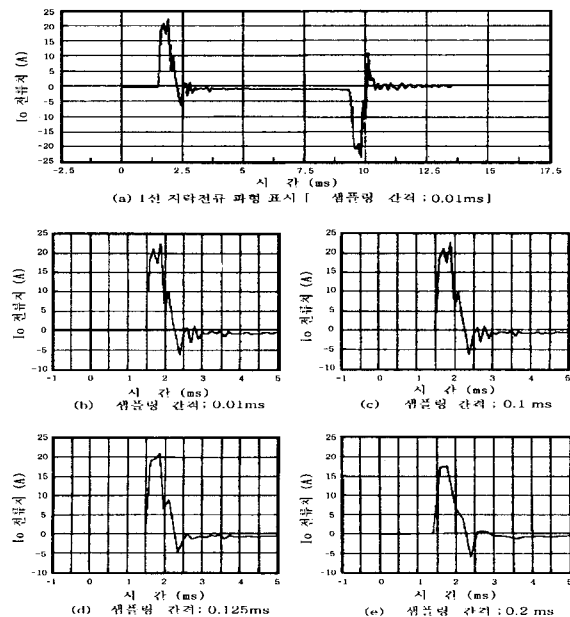


그림 3 다양한 샘플링 간격의 비교
Fig. 3 Comparison of various sampling rate

② 위상면궤적의 정규화

위상면궤적의 정규화는 종축과 횡축의 최대치가 1이 되도록 하였으며, 그 이유는 같은 종류의 고장의 경우 형상은 같으나 크기가 다를 수 있으므로 동종의 고장 파형을 위상면궤적으로 형상화하여 분류하고 가시적으로 도식화 할 뿐만 아니라, 고저항 사고의 경우 그 고장전류의 크기가 작아 일반 불평

형 부하 및 과부하에 의한 전류와 구분하기 어렵기 때문이다.

진행과의 정규화는 고장 전후의 각 상의 최대 전압 또는 전류값으로 정규화 하였으며, 전압·전류 위상면제적의 정규화는 횡축은 고장 전후의 각상 전압 또는 전류의 최대치로 종축은 횡축함수의 미분치중 최대치로 정규화 하였다. 또한, 위상면제적의 분석은 MATLAB을 이용하였다. 이는 EMTP로 모의한 전력계통 고장 데이터를 MATLAB의 변수값으로 쉽게 변환이 가능하기 때문이다.

3.2 Clarke법을 적용한 위상면제적 방법

전력계통 사고에 의하여 발생하는 불평형 고장 전압 및 전류를 해석하기 위한 일반적인 방법으로서 사용되는 Modal 변환에는 대칭좌표법(Symmetrical Components Analysis), Clarke 법(또는 $\alpha, \beta, 0$ 법), 카렌바우어법(Karrenbauer Transformation) 및 상좌표법 등이 있으며, 이 방법들은 3상회로를 단상회로로 치환함으로써 3상불평형 고장을 쉽게 해석할 수 있게 하여 준다.

고장분석에 일반적으로 적용하는 대칭좌표법은 정상, 역상 성분이 복소수의 형태를 가지게 되므로 위상면제적으로 분석하기에는 부적합하다. 따라서, 전압과 전류의 변환된 결과가 실수의 형태를 가지는 Clarke법을 적용하는 것이 보다 유효하다. 즉, 고장에 의하여 발생하는 불평형 3상 전압과 전류를 V_a, V_b, V_c 와 I_a, I_b, I_c 라고 할 때에 $\alpha, \beta, 0$ 성분은 3상 전압과 전류의 a, b, c 상 성분이 실수로 표현될 경우 $\alpha, \beta, 0$ 성분도 실수로 표현되며, 불평형 3상 전압과 전류의 a, b, c 상 성분이 복소수로 표현될 경우 $\alpha, \beta, 0$ 성분도 복소수로 표현되기 때문이다. 이 Clarke법은 3상회로 실측파형의 해석 등에서 많이 볼 수 있는 것과 같이 전기량을 실수로 표현하여 취급하고 싶은 경우에 주로 사용된다[10].

따라서, 불평형 고장전류를 Modal 변환을 사용한 위상면제적 분석 시에는 Clarke법이 대단히 유용하다. 일명 $\alpha, \beta, 0$ 법이라고도 불리는 Clarke법은 대칭좌표법이 3상회로의 a, b, c 상 성분을 0(영상), 1(정상), 2(역상) 성분으로 변환하는데 비해 3상회로 a, b, c 성분을 $\alpha, \beta, 0$ 성분으로 치환하는 해석법으로서 문제의 성질에 따라서는 대칭좌표법보다도 이 Clarke법이 유용한 경우도 많다. 고장에 의하여 발생하는 불평형 3상 전압과 전류를 V_a, V_b, V_c 와 I_a, I_b, I_c 라고 할 때에 식 (11), (12)와 같이 $\alpha, \beta, 0$ 성분으로 고장 전압과 전류 분석하게 된다. $\alpha, \beta, 0$ 성분의 특성을 살펴보면 α 전류성분은 a상에서 I_a 가 흐르고, b, c상에서 $1/2$ 씩 분류되어 돌아오므로 대지에 흐르지 않는다. β 전류성분은 a상과 대지에는 흐르지 않고, b상에 $\frac{\sqrt{3}}{2}I\beta$, c상에 $-\frac{\sqrt{3}}{2}I\beta$ 가 흐르며, b상에서 흘러 c상으로 되돌아온다. 0상 전류는 a, b, c상에 각각 I_0 가 흘러 대지로 I_0 가 되돌아온다. 즉, Clarke법에 있어서 영상전류의 정의는 대칭좌표법에 있어서 영상전류와 동일하게 정의되어 있다.

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \\ I_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (12)$$

본 논문에서는 전력계통사고시 발생하는 불평형 단락 및 지락고장의 특성을 위상면제적을 이용하여 분석할 경우 선간 단락 고장과 저저항 2선 지락고장의 특성이 비슷하여 상호간의 구별이 어려우므로 Modal 변환을 이용한 위상면제적을 사용하면 단락 고장 및 저저항 2선 지락고장의 판별이 용이하게 된다.

4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

4.1 시뮬레이션 모델 계통

다음 그림 4는 고저항을 포함한 전력계통의 사고를 모의하기 위하여 국내의 154 kV 실계통에 아크모델을 추가한 시뮬레이션 모델 계통이다. 그림 4의 점선부분이 전력계통의 고저항 지락사고를 모의하기 위하여 EMTP내에서 구현되는 산화아연(ZnO) 피뢰기 모델을 추가한 아크모델이다[11]. EMTP를 이용하여 모의된 고장은 저저항 1선지락(SLG), 2선지락(DLG), 3선지락(3 ϕ G), 고저항 1선지락(HISLG), 2선지락(HIDLG), 3선지락(HI3 ϕ G), 선간 단락(DLL), 3상단락(3 ϕ LL)이며, 송전선로의 중간지점인 13km에서 고장을 발생시켰으며, 고장발생각은 0° 고장과 90° 고장으로 가변하여 모의하였다.

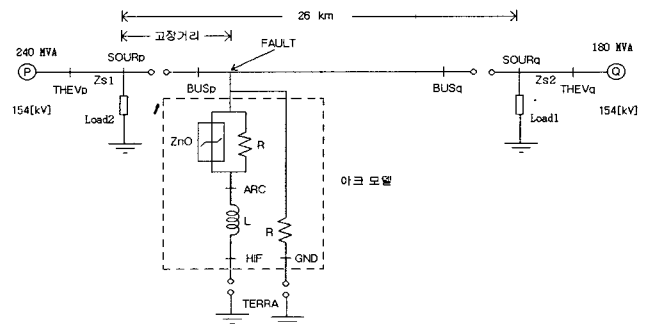


그림 4 154kV 모의 계통
Fig. 4 154 kV system simulated

4.2 위상면제적을 이용한 고장판별 결과

전력계통에서 저저항 1선 지락고장(a상, 고장 발생각 0°)이 발생한 경우의 각 상별 전압, 전류의 진행파형과 그 위상면제적은 그림 5와 같다. 건전상과 고장상의 위상면제적을 살펴보면 전압의 경우 고장 발생각에 따라 위상면제적 형태가 다르게 나타나고 있으며, 고장상과 건전상의 구별이 어려움을 알 수 있다. 전류의 경우는 이와 다르게 원점을 중심으로 작은 원을 그리던 위상면제적 중 고장이 발생한 a상의 전류는 급격히 증가하여 원점을 중심으로 정상시보다 수배의 반지름을 가지는 원의 위상면제적을 나타냄을 알 수 있다. 따라서, 저저항 1선 지락고장은 고장 전류의 위상면제적을 가지고 쉽게 판단 할 수 있다.

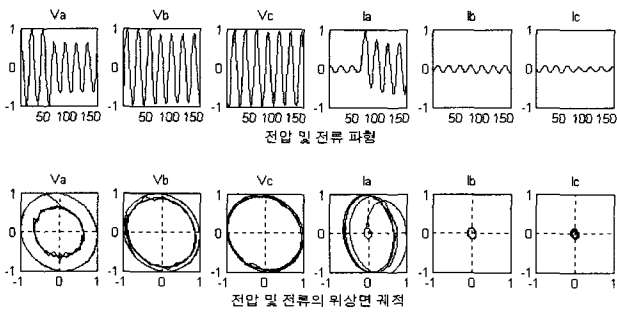


그림 5 1선 지락고장의 전압, 전류 위상면궤적

Fig. 5 Phase plane trajectory of V, I in SLG

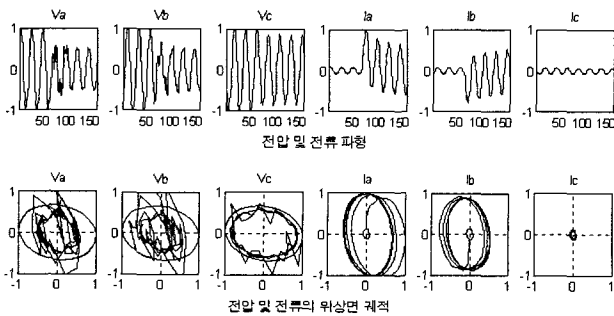


그림 6 2선 지락고장의 전압, 전류 위상면궤적

Fig. 6 Phase plane trajectory of V, I in DLG

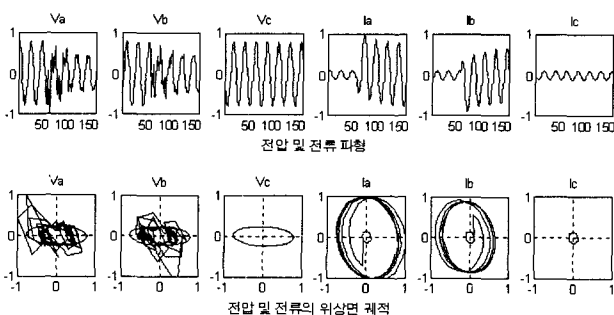


그림 7 선간 단락고장의 전압, 전류 위상면궤적

Fig. 7 Phase plane trajectory of V, I in DLL

그림 6은 저저항 2선 지락고장(a, b상, 고장 발생각 0°) 이 발생한 경우의 각 상별 전압, 전류의 진행파형과 그 위상면궤적으로, 전류의 경우는 저저항 1선 지락고장과 유사하게 원점을 중심으로 작은 원을 그리던 위상면궤적 중 고장이 발생한 a, b상의 전류는 급격히 증가하여 원점을 중심으로 정상시보다 수배의 반지름을 가지는 원 형태의 위상면궤적을 그림을 알 수 있다. 따라서, 저저항 2선 지락고장 또한 1선 지락고장과 같이 전류의 위상면궤적을 가지고 쉽게 판단 할 수 있다. 그러나 그림 7의 선간 단락 고장(a-b상, 고장 발생각 90°)의 위상면궤적을 분석하여 보면 선간 단락고장과 2선 지락고장의 전류 위상면궤적 모양이 유사하여 어느 것이 선간 고장인지 2선 지락고장인지 구별하기가 매우 어렵다. 그러므로 이 두 가지 고장형태를 구별하기 위한 새로운 방법이 요구된다.

전력계통의 3상 단락고장이 발생한 경우의 각 상별 전압, 전류의 진행파형과 그 위상면궤적은 그림 8(고장 발생각 0°)과 같다. 그림 8에서 보는 바와 같이 고장이 발생한 3상의 전류는 급격히 증가하여 원점을 중심으로 정상시보다 수 배 이상의 반지름을 가지는 원의 위상면궤적을 나타내므로 판별이 가능하고, 이 분석결과는 저저항 3상 지락고장의 파형과 같음을 알 수 있다. 이것은 저저항 3상 지락고장시 대지로 흐르는 고장전류는 없고 단지 전류로만 고장전류가 흐르게 되므로 3상 단락고장과 같은 양상을 띄게 됨을 알 수 있다.

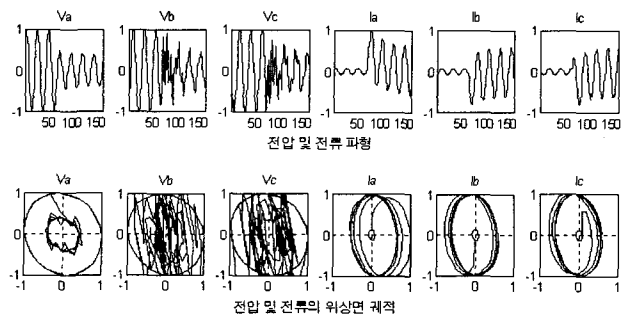


그림 8 3상 단락고장의 전압, 전류 위상면궤적

Fig. 8 Phase plane trajectory of V, I in $3\phi LL$

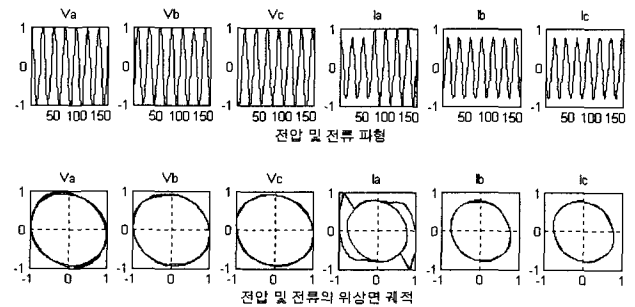


그림 9 고저항 1선 지락고장의 전압, 전류 위상면궤적

Fig. 9 Phase plane trajectory of V, I in HSLG

고저항 1선 지락고장이 발생한 경우의 각 상별 전압, 전류의 진행파형과 그 위상면궤적은 그림 9(a상, 고장 발생각 0°)와 같다. 그림 9에서 건전상과 고장상의 위상면궤적을 살펴보면 전압의 경우 고장 발생각에 따라 위상면궤적 형태가 정상시의 위상면궤적과 유사하여 고장여부를 판단하기 어려우나, 전류의 경우는 이와 다르게 1선 지락고장이 발생한 a상은 정상시 원점을 중심으로 하는 원을 그리다 고장이 발생하면 1, 4상한 및 2, 3상한을 중심으로 한 역대칭의 바람개비 형상을 그리게 된다. 이 결과는 그림 5의 저저항 a상 지락고장시 a상 전류가 원점을 중심으로 원을 그리는 것과 대조됨을 알 수 있고, 따라서, 고저항 지락사고시 전압과 전류의 변화로는 고장검출이 어렵지만 위상면궤적을 이용할 경우 고장검출이 가능함을 보여준다. 즉, 전류의 각 상별 위상면궤적을 이용하면 저저항 1선 지락고장과 고저항 1선 지락고장의 판별이 가능하다. 마찬가지로 고저항 2선 지락고장, 고저항 3상 지락고장도 고장상의 전류 위상면궤적만 1, 4상한 및 2, 3상한

을 중심으로 한 역대칭의 바람개비 형상을 그리게 된다. 따라서 고저항 사고의 경우에는 모든 고장종류를 판별할 수 있다.

표 1 각 고장별 전류의 위상면계적 비교 고찰
Table 1 Summary of phase plane trajectory of I under various faults

구분	위상면계적	특성	
지락	1선지락 (a상)	고장 a상은 건전상 보다 원점을 중심으로 수배 큰 지름을 갖는 원을 그림	
	2선지락 (ab상)	고장 a, b상은 건전상 보다 원점을 중심으로 수배 큰 지름을 갖는 원을 그림	
	3상지락	고장후 고장전보다 원점을 중심으로 수배 큰 지름을 갖는 원을 그림	
	사고	1선지락 (a상)	고장 a상 궤적은 건전상과 달리 바람개비 형상을 그림
		2선지락 (ab상)	고장 a, b상 궤적은 건전상과 달리 바람개비 형상을 그림
		3상지락	고장상 모두 건전상과 달리 바람개비 형상을 그림
단락사고	선간단락 (a,b상)	고장 a, b상은 건전상 보다 원점을 중심으로 수배 큰 지름을 갖는 원을 그림	
	3상단락	3상 지락과 같은 특성을 가지므로 위상면계적도 같은 형태를 가짐	

표 1에서는 각 고장별로 전류의 위상면계적을 비교 고찰하였다. 표 1에서 보는 바와 같이 각상별 전류의 위상면계적만으로도 모든 고장의 종류를 판별할 수 있고, 특히 고저항 사고와 저저항 사고는 원의 모양과 바람개비의 모양으로 판별할 수가 있었다. 저저항 3상 지락 및 3상 단락고장은 그 특성상 같은 고장이므로 위상면계적 또한 동일함을 이해할 수 있으나, 저저항 2선 지락고장과 선간 단락고장의 경우 위상면계적 특성이 비슷하여 위상면계적만으로는 고장형태 판별이 불가능하므로 이에 대한 대책이 필요하다.

4.3 Clarke법을 적용한 위상면계적 고장판별 결과

저저항 1선 지락고장이 a상에 발생할 경우 고장 발생각 0°에 대한 전압과 전류 α, β, 0 성분의 위상면계적은 그림 10과 같다. 고장 형상을 살펴볼 때 공통되면서 두드러진 특징은 전압 및 전류의 0 성분의 위상면계적이 고장이 발생하면 원점을 이탈하여 원점을 중심으로 하는 원형궤적을 그리는 것이다.

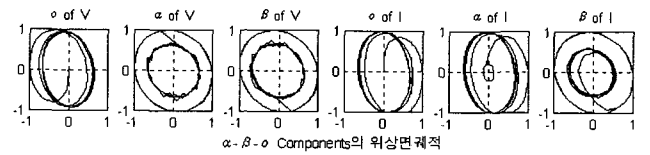


그림 10 1선 지락고장에서 전압, 전류의 α, β, 0 성분 위상면계적

Fig. 10 Phase plane trajectory of α, β, 0 component of V, I in SLG

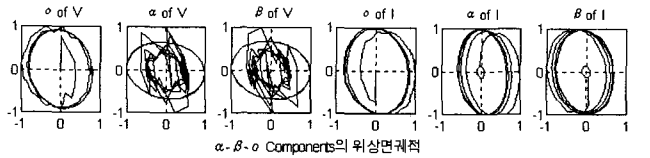


그림 11 2선 지락고장에서 전압, 전류의 α, β, 0 성분 위상면계적

Fig. 11 Phase plane trajectory of α, β, 0 component of V, I in DLG

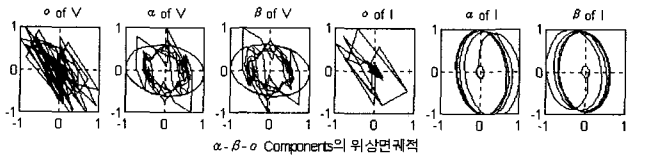


그림 12 선간 단락고장에서 전압, 전류의 α, β, 0 성분 위상면계적

Fig. 12 Phase plane trajectory of α, β, 0 component of V, I in DLL

그림 11과 12는 각각 저저항 2선 지락고장(a, b상, 고장 발생각 0°)과 저저항 선간 단락고장(a-b상, 고장 발생각 0°)의 전압과 전류 α, β, 0 성분에 대한 위상면계적이다. 전압 및 전류의 0 성분을 분석하면 저저항 2선 지락고장은 원을 그리는 반면에 저저항 선간 단락은 위상면계적이 직선의 다발형태로 원점부근에 분포한다. 따라서, 여러 가지 Modal 변환중 Clarke법을 위상면계적에 적용하면 이 두 가지 고장을 서로 판별해 낼 수가 있다.

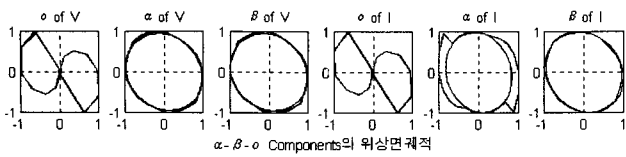


그림 13 고저항 1선 지락고장에서 전압, 전류의 α, β, o 성분 위상면계적

Fig. 13 Phase plane trajectory of α, β, o component of V, I in HISLG

그림 13에는 고저항 1선 지락고장(a상, 고장 발생각 0°)에 대한 전압과 전류의 α, β, o 성분에 대한 위상면계적이다. 그림 13에서 분석하면 알 수 있듯이 전압 및 전류의 o 성분의 위상면계적의 고유특성은 저저항 1선 지락고장의 경우 원점을 중심으로 하는 원계적을 그리는 데 반하여, 고저항 1선 지락사고의 경우는 1, 4 상한 및 2, 3 상한에 각각 원점을 걸치는 반원을 그리며 역대칭의 궤적을 나타냄을 알 수 있다. 고저항 2선 지락고장, 고저항 3상 지락고장 또한 전압 및 전류의 o 성분의 위상면계적으로 판별이 가능하며 α, β 성분의 위상면계적은 모두 동일하게 나타난다.

Clarke법을 이용한 위상면계적을 종합적으로 분석하여 전력계통 사고시 전압과 전류에 대한 α, β, o 성분 중 그 특징을 가장 잘 나타내는 o 성분 전류의 궤적을 살펴보면 표 2와 같다. 저저항 지락고장의 경우 1선 지락고장과 2선 지락고장은 그 특성을 명확히 구분하기가 어려운 면이 있고, 마찬가지로 선간 단락고장과 3상 단락고장의 경우도 판별이 용이하지 않다. 그러나 이것은 4.2절에서 제시하였던 각 a, b, c 상의 전압, 전류 위상면계적과 연동하여 비교 분석할 경우 쉽게 판별이 가능하기 때문에 Clarke법을 이용한 위상면계적은 2선 지락고장과 선간 단락고장의 판별에 아주 유용하게 쓰일 수 있다. 또한 고저항 사고만의 경우에는 a, b, c 상의 전압, 전류를 이용한 위상면계적 방법보다 더욱 뚜렷한 특징을 나타내므로 정확한 판별을 위해서는 Clarke법을 이용한 위상면계적 방법이 사용되어야 할 것이다.

5. 결 론

전력계통 사고시 고장판별기법의 하나로서 위상면계적이란 새로운 판별방법을 제시하였다. 제안된 방법은 파형의 특징을 위상면계적의 이론을 이용하여 도식화할 뿐 아니라 고장 원인에 대한 정보를 시각적으로 전력계통 운전자에게 제공하고, 특히 Clarke법을 이용한 위상면계적 분석시 고저항 지락고장을 정확히 판정할 수 있으므로 고저항 사고를 포함한 전력계통의 모든 사고에 대해 적용이 가능하다. 세부적인 결과를 열거하면 다음과 같다.

(1) 전력계통 사고시 각상의 전압과 전류를 정규화하고 이를 다시 위상면계적에서 횡축과 종축의 최대치로 정규화함으로써 고장 전압 및 전류의 크기와는 무관하게 고장 판별이 가능토록 하였다.

표 2 각 고장별 전류의 o 성분 위상면계적 비교 고찰

Table 2 Summary of phase plane trajectory using o component of I under various faults

구분	위상면계적	특성
저저항	1선 지락 (a상)	원점을 중심으로 하는 원계적
	2선 지락 (ab상)	원점을 중심으로 하는 원계적
	3상 지락	직선 다발이 원점부근에 분포
고저항	1선 지락 (a상)	1, 4 상한 및 2, 3 상한에 각각 원점을 걸치는 반원이 역대칭을 이룸
	2선 지락 (ab상)	1, 4 상한 및 2, 3 상한에 각각 원점을 걸친 1개의 반원과 원점을 걸치지 않는 반원이 역대칭을 이룸
	3상 지락	1, 4 상한 및 2, 3 상한에 각각 원점을 걸치지 않는 반원이 역대칭을 이룸
단락사고	선간 단락 (ab상)	직선 다발이 원점부근에 분포
	3상 단락	직선 다발이 원점부근에 분포

(2) 고장상의 전압과 전류를 위상면계적을 이용하여 형상화함으로써 고장시 미소한 전압과 전류 변동에 의하여 검출하기 어려운 고저항 지락 사고를 판별 가능토록 하였으며, 이는 전력계통 보호설비의 신뢰성 증가에 유용하리라 사료된다.

(3) 일반적인 2선 지락 고장과 선간 단락 고장의 구분을 명확히 하기 위하여 위상면계적에 Clarke법을 접목시킴으로써, 보다 명확한 고장형태의 판별이 가능하게 하였다. 이상에서 열거한 바와 같이 기존의 고조파 해석방법과는 다른 새로운 파형해석방법으로 위상면계적의 적용 가능

성을 제시함으로써 사고과형을 객관적으로 분류, 판별하는 것이 가능할 뿐만 아니라 효율적인 고장관별개념을 제시하였다. 향후, 이를 실제 하드웨어로 구현하는 연구가 수행될 경우 송전계통 뿐만 아니라 배전계통에서의 부하전류 및 최대감도 고장전류에 대한 연구도 추가적으로 추진되어야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 및 한국과학재단의 ERC 프로그램을 통한 지원으로 이루어졌으며 이에 감사를 드립니다.

참고 문헌

[1] B.D. Ruslivery, vol. 4, no. 1, pp. 132-140, January 1989.

[2] “配電線地絡事故における波形と原因判別法”, 電學論B, no. 115, pp. 18-2sell, R.P. Chinchali, “A Digital Signal Processing Algorithm for Detecting Arcing Faults on Power Distribution Feeders”, IEEE Transactions on Power De3 (平7-1).

[3] W.H. Kwon, G.W. Lee, Y.M. Park, M.C. Yoon, M.H. Yoo, “High Impedance Fault Detection utilizing Incremental Variance of Normalized even Harmonic Power”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 6, no. 2, pp. 557-564, April 1991.

[4] 田中賢示, “地絡事故發生時の零相電壓・電流波形による事故原因判別”, 平7電氣學會電力・エネルギー大會, no. 425.

[5] M. Aucoin, “Status of High Impedance Fault Detection”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 104, no. 3, pp. 638-643, March 1985.

[6] 堀田 剛, 住吉正弘, 若井武夫, 池田長康, 北村岩雄, “位相面軌跡による配電線地絡事故波形分類法”, 電學論B, no. 117, pp. 196-202 (平9).

[7] 計測自動制御學會編, “自動制御ハンドブック 基礎編”, オーム社.

[8] S.M. Shinnars, “Modern Control System Theory and Application”, Division of Sperry Rand Corporation and The Cooper Union, 1972.

[9] M. Aucion, B.D. Russell, “Detection of Distribution High Impedance Faults using Burst Noise Signals Near 60Hz”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 2, no. 2, pp. 342-348, April 1987.

[10] M.M. Mansour, G.W. Swift, “A Multi- Microprocessor Based Travelling Wave Relay- Theory and Realization”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 1, no. 1, pp. 272-279, January 1986.

[11] 김현, 김철환, “Wavelet 변환을 이용한 고저항 지락고장 검출”, 대한전기학회논문지, 제 48권, 9호, pp. 1492-1497, 1999. 12.

저 자 소 개

박 남 옥 (朴 南 沃)

1956년 5월 3일생. 1980년 성균관대 전기공학과 졸업. 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(공석). 현재 한국전기연구원 전기사험연구소 검수시험실장.

Tel : 031-420-6004

Fax : 031-420-6029

E-mail : nopark@keri.re.kr

신 영 철 (申 榮 澈)

1962년생. 2000년 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학과 졸업(공석). 현재 캐나다 유학 중

E-mail : sinyc@videotron.ca

안 상 필 (安 相 泌)

1972년 10 19일생. 1997년 성균관대학교 전기공학과 졸업, 현재 동 대학원 정보통신통학부 박사과정, 한국전기연구원 전기사험연구소 검수시험실 기술연구원

Tel : (031) 420-6013

Fax : (031) 420-6029

E-mail: spahn@keri.re.kr

여 상 민 (呂 相 敏)

1976년 7월 21일생. 1999년 성균관대 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 정보통신공학부 박사과정.

Tel : 031-290-7166

Fax : 031-290-7955

E-mail : harc@chollian.net

김 철 환 (金 喆 煥)

1961년 1월 10일생. 1982년 성균관대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 현재 성균관대 정보통신공학부 교수. 명지대 차세대전력기술연구센터

Tel : 031-290-7124

Fax : 031-290-7179

E-mail : chkim@skku.ac.kr