

Clarke법과 위상면궤적을 이용한 고저항 지락사고의 판별에 관한 연구

김철환  
성균관대 산업전자응용연구소

신영철, 안상필  
성균관대 전기 전자 및 컴퓨터공학과

A Study on the Classification of High Impedance Faults using Clarke Transformation and Plane Trajectory Method

C.H. Kim  
IEAC, Sungkyunkwan Univ.

Y.C. Shin, S.P. Ahn  
Dept. of Electrical & Computer Eng., Sungkyunkwan Univ.

**Abstract** - This paper presents a new classification method for high impedance faults in power systems. 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 using EMTF. As can be seen from results, phase plane trajectory of postfault current should be combined with that of  $v$  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.

1. 서 론

산업발전에 따른 전력수요의 증가로 우리나라 전력계통은 급속히 확대되어 왔으며 따라서, 고품질의 보다 안정적인 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 계속 증대되고 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 고장상태에 따른 다양한 전류의 형태 및 크기 때문에 이의 검출 및 판별이 쉽지 않고, 고저항 지락사고의 피해 또한 작지 않다[1]. 따라서, 전력계통에 사고가 발생할 경우 고장 형태를 정확히 판별하여 초기에 고장점을 분리할 수 있도록 보호계전시스템에 정보를 제공할 필요성이 있다. 전력계통 사고시의 전압파형, 전류파형으로 고장형태를 판별하는 방법으로는 고조파 해석을 중심으로 하는 방법, 파형을 취급하는 방법 등 지금까지 몇 가지가 보고되어 있으며, 현재도 연구가 계속 진행되고 있다[2-5].

본 논문은 새로운 파형해석방법으로서 비선형제어계의 해석방법의 하나인 위상면궤적에 의한 방법[6,7]을 전력계통의 고장판별에 적용하여 제시하였다. 아울러, 효율적이고 분명한 고장판별을 위해 Modal 변환을 추가로 도입하였으며[8-10], Clarke법의  $\alpha, \beta, \theta$  성분을 이용한 위상면궤적 고장판별기법을 제안하였다.

또한, 고저항을 포함한 전력계통의 고장현상을 EMTF를 이용하여 모의함으로써 실제 상황과 근접한 자료를 얻을 수 있었으며[11], 위상면궤적 분석방법에  $\alpha, \beta, \theta$  변환방법을 새롭게 접목시켜 모형화함으로써 단락 및 저저항 지락고장과 고저항 지락고장의 검출을 보다 명확히 할 수 있음을 결론으로 도출하였다.

2. 위상면궤적 이론

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  $x$ 의 변화는 위상면(phase plane)으로 알려진 도면 위에 속도  $dx/dt$ 에 대하여 그려지며, 특정한 입력에 대한

곡선을 궤적(trajjectory)라 한다. 특정한 변위 대 속도의 곡선군은 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.

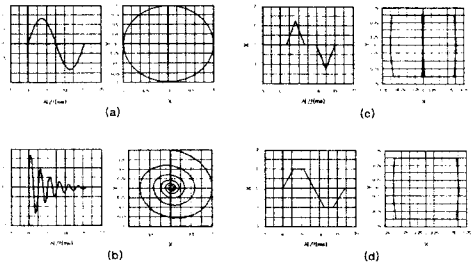


그림 1. 다양한 입력파형에 대한 위상면궤적

즉, 요약하면, 위상면궤적이란 횡축에 시간  $t$ 를 포함하는 변위  $x$ 를 취하고, 종축에 그 함수의 1차미분  $dx/dt$ 를 취하는 위상면상에서 초기상태로부터 출발하는 궤적을 그리는 방법을 말하며, 전력계통에서 1상의 정상상태를 나타내는 sinc 파형 형태의 경우 그림 1(a)와 같이 원형을 나타내고, 감쇄진동의 경우는 그림 1(b)와 같이 원점을 향하는 달팽이 모양의 형태를 띄게 되며, 삼각파의 경우는 그림 1(c)와 같은 사다리꼴 형태의 궤적을 나타내며, 태형파의 경우 그림 1(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. 이러한 위상면궤적을 파형 판별에 적용할 때 반드시 고려되어야 할 점은 ① 본래의 파형 특성을 잃지 않고 판별하기 쉬운 적절한 샘플링 간격을 결정할 필요가 있으며, ② 고장에 의한 전압 및 전류의 크기가 전력계통의 여건에 따라 다르게 나타나므로 정규화 할 필요가 있다.

3. Clarke법을 적용한 위상면궤적 방법

전력계통 사고에 의하여 발생하는 불평형 고장 전압 및 전류를 해석하기 위한 일반적인 방법으로서 사용되는 Modal 변환 중에서 고장분석에 가장 널리 응용되는 대칭좌회법은 정상, 역상 성분이 복소수의 형태를 가지게 되므로 위상면궤적으로 분석하기에는 부적합하다. 따라서, 전압과 전류의 변환된 결과가 실수의 형태를 가지는 Clarke법을 적용하는 것이 보다 유효하다. 이러한 측면에서 Clarke법은 3상회로 실측파형의 해석 등에서 많이 볼 수 있는 것과 같이 전기량을 실수로 표현하여 취급하고 싶은 경우에 주로 사용된다[10].

따라서, 불평형 고장전류를 Modal 변환이 사용된 위상면궤적으로 분석 시에는 Clarke법이 대단히 유용하다. 일명  $\alpha, \beta, \theta$  법이라고도 불리는 Clarke법은 대칭좌회법이 3상회로의 a, b, c 상 성분을 0(영상), 1(정상), 2(역상) 성분으로 변환하는데 비해 3상회로 a, b, c 성분을  $\alpha, \beta, \theta$  성분으로 치환하는 해석법으로서 문제의 성질에 따라서는 대칭좌회법보다도 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 (1)과 식 (2)와 같이  $\alpha,$

$\beta$ ,  $\theta$  성분으로 고장 전압과 전류 분석하게 된다.

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

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

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

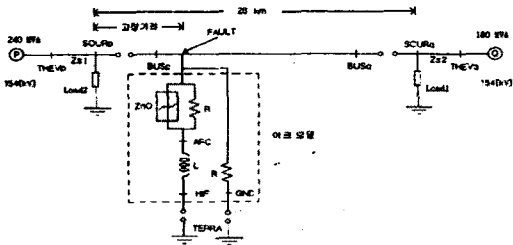


그림 2. 154 kV 모의 계통

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

##### 4.2 위상면제적을 이용한 고장판별 결과

표 1에서는 각 고장별로 전류의 위상면제적을 비교 고찰하였다. 각 고장별로 위상면제적 결과를 간단히 살펴보면, 전력계통에서 저저항 1선 지락고장이 발생한 경우의 각 상별 전류는 원점을 중심으로 작은 원을 그리던 위상면제적을 고장이 발생한 a상의 전류는 급격히 증가하여 원점을 중심으로 정상시보다 수배의 반지름을 가지는 원의 위상면제적을 나타냄을 알 수 있다. 저저항 2선 지락고장이 발생한 경우 전류는 저저항 1선 지락고장과 유사하게 원점을 중심으로 작은 원을 그리던 위상면제적 중 고장이 발생한 a, b상의 전류는 급격히 증가하여 원점을 중심으로 정상시보다 수배의 반지름을 가지는 원 형태의 위상면제적을 그림을 알 수 있다. 또한, 전력계통의 3상 단락고장이 발생한 경우에는 고장이 발생한 3상의 전류는 급격히 증가하여 원점을 중심으로 정상시보다 수배 이상의 반지름을 가지는 원의 위상면제적을 나타내므로 판별이 가능하고, 이 분석결과는 저저항 3상 지락고장의 파형과 같음을 알 수 있다. 그러므로, 결과에서 알 수 있듯이 저저항 1선지락, 2선지락, 3상단락 및 3상지락은 고장 전류의 위상면제적을 가지고 쉽게 판단할 수 있다.

그러나, 선간 단락 고장의 위상면제적을 분석하여 보면 선간 단락고장과 2선 지락고장의 전류 위상면제적 모양이 유사하여 어느 것이 선간 고장인지 2선 지락고장인지 구별하기가 매우 어렵다. 그러므로 이 두 가지 고장형태를 구별하기 위한 새로운 방법이 요구된다.

고저항 1선 지락고장이 발생한 경우의 각 상별 전압, 전류의 진행파형과 그 위상면제적은 그림 3(a상, 고장 발생 각 0°)과 같다. 그림 3에서 건전상과 고장상의 위상면제적을 살펴보면 전압의 경우 고장 발생각에 따라 위상면제적 형태가 정상시의 위상면제적과 유사하여 고장여부를 판단하

기 어려우나, 전류의 경우는 이와 다르게 1선 지락고장이 발생한 a상은 정상시 원점을 중심으로 하는 원을 그리다 고장이 발생하면 1, 4상한 및 2, 3상한을 중심으로 한 영역 대칭의 바람개비 형상을 그리게 된다. 따라서, 고저항 지락 사고시 전압과 전류의 변화로는 고장검출이 어렵지만 위상면제적을 이용할 경우 고장검출이 가능함을 보여준다. 즉, 전류의 각 상별 위상면제적을 이용하면 저저항 1선 지락고장과 고저항 1선 지락고장의 판별이 가능하다. 마찬가지로 고저항 2선 지락고장, 고저항 3상 지락고장도 고장상의 전류 위상면제적만 1, 4상한 및 2, 3상한을 중심으로 한 영역 대칭의 바람개비 형상을 그리게 된다. 따라서 고저항 사고의 경우에는 모든 고장종류를 판별할 수 있다.

표 1. 각 고장별 전류의 위상면제적 비교 고찰

구분	위상면제적	특성
지락	1선 지락 (a상)	고장 a상은 건전상보다 원점을 중심으로 수배 큰 지름을 갖는 원을 그림
	2선 지락 (ab상)	고장 a, b상은 건전상보다 원점을 중심으로 수배 큰 지름을 갖는 원을 그림
	3상 지락	고장후 고장전보다 원점을 중심으로 수배 큰 지름을 갖는 원을 그림
사고	1선 지락 (a상)	고장 a상 제적은 건전상과 달리 바람개비 형상을 그림
	2선 지락 (ab상)	고장 a, b상 제적은 건전상과 달리 바람개비 형상을 그림
	3상 지락	고장상 모두 건전상과 달리 바람개비 형상을 그림
단락사고	선간 단락 (ab상)	고장 a, b상은 건전상보다 원점을 중심으로 수배 큰 지름을 갖는 원을 그림
	3상 단락	3상 지락과 같은 특성을 가지므로 위상면제적도 같은 형태를 가짐

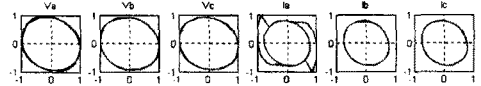
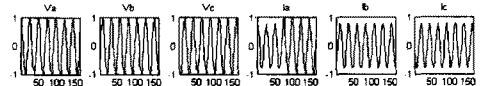


그림 3. 고저항 1선 지락고장의 전압, 전류 위상면제적

요약하면, 표 1에서 보는 바와 같이 각상별 전류의 위상면제적만으로도 모든 고장의 종류를 판별할 수 있고, 특히 고저항 사고와 저저항사고는 원의 모양과 바람개비의 모양

으로 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

Clarke법을 이용한 위상면계적을 종합적으로 분석하여 전력계통 사고시 전압과 전류에 대한  $\alpha, \beta, 0$  성분 중 그 특징을 가장 잘 나타내는 0 성분 전류의 궤적을 살펴보면 표 2와 같다. 저저항 1선 지락고장이 a상에 발생할 경우 전압과 전류  $\alpha, \beta, 0$  성분의 위상면계적 중에서 공통되면서 두드러진 특징은 전압 및 전류의 0 성분의 위상면계적이 고장이 발생하면 원점을 이탈하여 원점을 중심으로 하는 원형 궤적을 그리는 것이다. 저저항 2선 지락고장과 저저항 선간 단락고장의 전압과 전류  $\alpha, \beta, 0$  성분에 대한 전류의 0 성분을 분석하면 저저항 2선 지락고장은 원을 그리는 반면에 저저항 선간 단락은 위상면계적이 직선의 다발형태로 원점부근에 분포한다. 따라서, 여러 가지 Modal 변환 중 Clarke법을 위상면계적에 적용하면 이 두 가지 고장을 서로 판별해 낼 수가 있다.

표 2. 각 고장별 전류의 0 성분 위상면계적 비교 고찰

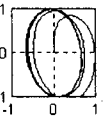
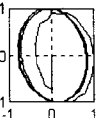
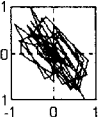
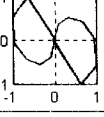
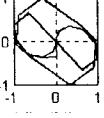
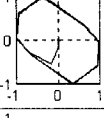
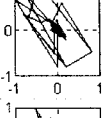
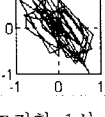
구분	위상면계적	특성
지락	1선 지락 (a상)	 원점을 중심으로 하는 원계적
	2선 지락 (ab상)	 원점을 중심으로 하는 원계적
	3상 지락	 직선 다발이 원점부근에 분포
사고	1선 지락 (a상)	 1, 4 상한 및 2, 3 상한에 각각 원점을 걸치는 반원이 역대칭을 이룸
	2선 지락 (ab상)	 1, 4 상한 및 2, 3 상한에 각각 원점을 걸친 1개의 반원과 원점을 걸치지 않는 반원이 역대칭을 이룸
	3상 지락	 1, 4 상한 및 2, 3 상한에 각각 원점을 걸치지 않는 반원이 역대칭을 이룸
단락사고	선간 단락 (ab상)	 직선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

그림 4에는 고저항 1선 지락고장(a상, 고장 발생각  $0^\circ$ )에 대한 전압과 전류의  $\alpha, \beta, 0$  성분에 대한 위상면계적이다. 그림 4에서 분석하면 알 수 있듯이 전압 및 전류의 0 성분의 위상면계적의 고유특성은 저저항 1선 지락고장의 경우 원점을 중심으로 하는 원형 궤적을 그리는 데 반하여, 고저항 1선 지락사고의 경우는 1, 4 상한 및 2, 3 상한에 각

각 원점을 걸치는 반원을 그리며 역대칭의 궤적을 나타냄을 알 수 있다. 따라서, 고저항 2선 지락고장, 고저항 3상 지락고장 또한 전압 및 전류의 0 성분의 위상면계적으로 판별이 가능하며  $\alpha, \beta$  성분의 위상면계적은 모두 동일하게 나타난다.

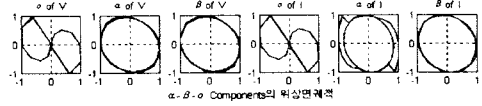


그림 4. 고저항 1선 지락고장에서 전압, 전류의  $\alpha, \beta, 0$  성분 위상면계적

요약하면, 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 경우에도 a, b, c 상의 전압, 전류를 이용한 위상면계적 방법보다 더욱 뚜렷한 특징을 나타내므로 정확한 판별을 위해서는 Clarke법을 이용한 위상면계적 방법이 사용되어야 할 것이다.

### 5. 결론

전력계통 사고시 고장판별기법의 하나로서 위상면계적이라는 새로운 판별방법을 제시하였다. 제안된 방법은 파형의 특징을 위상면계적의 이론을 이용하여 도식화할 뿐 아니라 고장원인에 대한 정보를 시각적으로 전력계통 운전자에게 제공하고, 특히 Clarke법을 이용한 위상면계적 분석시 고장상의 전압과 전류의 0 성분을 위상면계적을 이용하여 정상화함으로써 고장시 미소한 전압과 전류 변동에 의하여 검출하기 어려운 고저항 지락 사고를 판별 가능토록 하였으며, 이는 전력계통 보호설비의 신뢰성 증가에 유용하리라 사료된다. 따라서 고저항 사고를 포함한 전력계통의 모든 사고에 대해 본 논문에서 제시한 고장판별법의 적용이 가능하다. 향후, 이를 실제 하드웨어로 구현하는 연구가 추진되어야 할 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호: 2000 2 30200 003 3) 지원으로 수행되었음.

#### (참고 문헌)

- B.D. Russell, R.P. Chinchali, "A Digital Signal Processing Algorithm for Detecting Arcing Faults on Power Distribution Feeders", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 4, no. 1, pp. 132-140, January 1989.
- "配電線路事故における波形と原因判別法", 電學論B, no. 115, pp. 18-23 (平7-1).
- 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.
- 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法", 平7電氣學會電力・エネルギー大會, no. 425.
- M. Aucoin, "Status of High Impedance Fault Detection", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 104, no. 3, pp. 638-643, March 1985.
- 堀田 剛, 伊吉正弘, 若井武夫, 池田長康, 北村岩雄, "位相面軌跡による配電線路事故波形分類法", 電學論B, no. 117, pp. 196-202 (平9).
- 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.
- S.M. Shinnars, "Modern Control System Theory and Application", Division of Sperry Rand Corporation and The Cooper Union, 1972.
- 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.
- 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.
- 김원, 김철환, "Wavelet 변환을 이용한 고저항 지락고장 검출", 대한전기학회논문지, 제 48권, 9호, pp. 1492-1497, 1999. 12.