

복소전력의 변화율을 이용한 동기탈조 검출 알고리즘에 관한 연구-Part I: 복소평면에서의 복소전력의 궤적변화

論 文
54A-7-4

A Study on the Out-of-Step Detection Algorithm using Time Variation of Complex Power-Part I : The Variation of Complex Power Trajectory in Complex Plane

權 五 相[†] · 金 喆 煥^{*}
(O-Sang Kwon · Chul-Hwan Kim)

Abstract - An out-of-step condition results from the loss of the synchronism of the generators. A disturbance in a power system causes the generator angle to oscillate. When there is a severe disturbance such as a heavy current fault, loss of major generation or loss of a large block of load, the oscillation can be severe and even increase largely and finally the out-of-step condition may occur. During the power swing and out-of-step conditions, the apparent impedance at a relay location changes, and the power flow also changes as the angle difference is varied.

This paper presents a method to analyze the trajectory of complex power during a power swing and out-of-step condition. The trajectory of the complex power is analyzed when a power swings and a fault occurs. Moreover, the complex power is analyzed when the ratios between the voltages at both sides and the line impedances are changed. These methods are verified through simulation using the ATP/EMTP MODELS.

Key Words : Out-of-step, Power Swing, Power System, Complex Power, EMTP

1. 서 론

현대 산업시대에서 전기품질과 계통의 안정성은 중대한 하나의 문제로 떠오르고 있다. 특히 정밀한 제품을 생산하는 산업체에서의 전기품질과 계통의 안정성은 생산성에 영향을 미치는 중요한 요소로 작용하고 있다. 따라서 전력 계통에서 안정도에 영향을 미치는 고장에 의한 동기탈조 현상의 발생은 조기에 발견되고 저지되어야 한다[1-5]. 기존의 동기탈조 검출 알고리즘 중 하나인 피상 임피던스 궤적 추적법을 이용한 방식은 전력동요 현상과 동기탈조 현상 발생시 궤적의 이동속도를 이용하여 고장과 판별한다[6].

본 논문은 과도 상태에 의한 전력동요 현상과 동기탈조 현상 발생 시, 복소전력의 변화를 수학적으로 분석하는데 그 목적이 있다. 복소평면상에서 복소전력의 궤적을 수학적으로 모델링하고 이를 이용하여 전력동요 현상과 동기탈조 현상 발생 시, 발전기 각 변화에 따른 복소전력의 궤적을 수학적으로 분석하였다.

본 논문은 전력동요 현상 발생시 복소전력의 궤적을 수학적으로 분석하고, 제시된 이론에 따라 실제 계통을 간략화한 시뮬레이션 모델을 통하여 전력동요현상과 동기탈조 현상 발생시의 복소전력의 궤적을 ATP/EMTP MODELS를 이용하여 시뮬레이션 하였다[7-9].

2. 복소전력의 특성

2.1 동기탈조현상과 전력동요현상

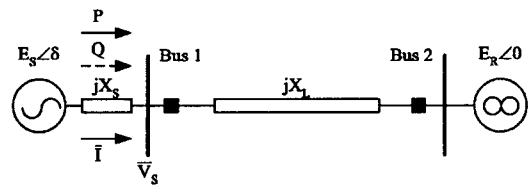


그림 1 1기 무한 모선 계통

Fig. 1 One machine infinite bus (OMIB)

전력계통에서 고장이 발생하거나 급격한 부하변동 등으로 인한 전압 또는 주파수가 일정 범위를 벗어날 때 과도상태 심화에 따른 발전기의 가속, 감속에 의하여 발생하는 현상을 전력동요 현상이라 하며 전력동요 현상이 심화되어 동기 상태에서 운전이 불가능하게 되는 경우를 동기탈조 현상이라 한다. 이러한 동기탈조 현상이 발생하는 이유는 하나의 발전기 군이 과도한 외란에 의하여 다른 발전기 군보다 가속되므로 두 발전기군 사이에 동기탈조가 발생하기 때문이다. 그림 1과 같은 1기 무한 모선 모델에서 유효전력 P 와 무효전력 Q 는 양단 전압 $E_s \angle \delta$ 와 $E_R \angle 0$ 간의 상차각 δ 에 의하여 결정되며 상차각 δ 는 동요방정식에 의하여 결정된다[5-6]. 따라서 전력동요 현상과 동기탈조 현상을 분석하기 위하여 다음과 같은 두 가지 특성이 고려되어야 한다.

- (1) 상차각에 따른 조류, (2) 상차각 변화.

[†] 교신저자, 學生會員 : 成均館大 工大 電子電氣工學 專攻 碩士課程
E-mail : dinosur@hanmail.net

^{*} 正 會 員 : 成均館大 工大 電子電氣工學 專攻 教授 · 工博
接受日字 : 2005年 1月 28日
最終完了 : 2005年 6月 9日

2.1 상차각에 따른 조류

2.2.1 상차각에 따른 복소전력

그림 1과 같은 1기 무한 모선 계통의 BUS1에서 측정된 전압 \bar{V}_S 는 다음 식 (1)과 같다.

$$\bar{V}_S = \frac{E_R \angle 0 \cdot jX_S + E_S \angle \delta \cdot jX_L}{j(X_S + X_L)} \quad (1)$$

이를 정리하면 다음 식 (2)와 같이 정리할 수 있다.

$$\bar{V}_S = \frac{X_S E_R \angle 0 + X_L E_S \angle \delta}{X_S + X_L} \quad (2)$$

Bus1의 전류 \bar{I} 는 다음 식 (3)과 같다.

$$\bar{I} = \frac{E_S \angle \delta - E_R \angle 0}{j(X_S + X_L)} \quad (3)$$

복소전력 \bar{S} 는 전류 \bar{I} 의 conjugate를 사용하므로 식 (3)을 변형하면 다음 식 (4)와 같이 변형된다.

$$\bar{I}^* = \frac{E_S \angle (-\delta) - E_R \angle 0}{-j(X_S + X_L)} \quad (4)$$

복소전력 \bar{S} 는 다음 식 (5)와 같이 정의 된다.

$$\bar{S} = \bar{V}_S \bar{I}^* = P + jQ \quad (5)$$

식 (2)와 식 (4)를 이용하여 식 (5)를 정리하면 다음 식 (6)과 같이 변형된다.

$$\bar{S} = \frac{j[E_S^2 X_L - E_R^2 X_S] + j[X_S E_R E_S \angle (-\delta)] - j[X_L E_R E_S \angle \delta]}{(X_S + X_L)^2} \quad (6)$$

식 (6)의 분자부분에서 $j|E_R||E_S||X_S|\angle(-\delta)$ 는 다음 식 (7)과 같이 변형할 수 있다.

$$\begin{aligned} & j|E_R||E_S||X_S|\angle(-\delta) \\ &= j|X_S||E_R||E_S|(\cos(-\delta) + j\sin(-\delta)) \\ &= -|X_S||E_R||E_S|\sin(-\delta) + j|X_S||E_R||E_S|\cos(-\delta) \quad (7) \\ &= |X_S||E_R||E_S|\sin(\delta) + j|X_S||E_R||E_S|\cos(\delta) \\ &\because \sin(-\delta) = -\sin \delta, \cos(-\delta) = \cos \delta \end{aligned}$$

식 (7)과 마찬가지로 $-j|E_R||E_S||X_L|\angle\delta$ 는 다음 식 (8)과 같이 변형할 수 있다.

$$\begin{aligned} & -j|E_R||E_S||X_L|\angle\delta \\ &= -j|X_L||E_R||E_S|(\cos \delta + j\sin \delta) \quad (8) \\ &= |X_L||E_R||E_S|\sin \delta - j|X_L||E_R||E_S|\cos \delta \end{aligned}$$

식 (7)과 (8)을 이용 복소전력 S 를 정리한 뒤 $S = P + jQ$ 형태로 분리하면 다음 식 (9), (10)과 같이 유효전력, 무효전력으로 분리할 수 있다.

$$P = \frac{\{|X_L||E_R||E_S| + |X_S||E_R||E_S|\} \sin \delta}{(X_S + X_L)^2} \quad (9)$$

$$Q = j \left\{ \frac{|X_S||E_R||E_S|\cos \delta - |X_L||E_R||E_S|\cos \delta + |X_L||E_S|^2 - |X_S||E_R|^2}{(X_S + X_L)^2} \right\} \quad (10)$$

유효전력 P 인 식 (9)은 다음 식 (11)과 같이 변형할 수 있다.

$$P = \frac{\{|X_L||E_R||E_S| + |X_S||E_R||E_S|\} \sin \delta}{(X_S + X_L)^2} \quad (11)$$

$$= A \sin \delta$$

$$A \equiv \frac{\{|X_L||E_R||E_S| + |X_S||E_R||E_S|\}}{(X_S + X_L)^2}$$

여기서,

이와 마찬가지로 무효전력 Q 인 식 (10)은 다음 식 (12)와 같이 변형 할 수 있다.

$$Q = j \left\{ \frac{|X_S||E_R||E_S|\cos \delta - |X_L||E_R||E_S|\cos \delta + |X_L||E_S|^2 - |X_S||E_R|^2}{(X_S + X_L)^2} \right\} \quad (12)$$

$$= B \cos \delta + \alpha$$

$$B \equiv j \left(\frac{|X_S||E_R||E_S| - |X_L||E_R||E_S|}{(X_S + X_L)^2} \right)$$

$$\alpha \equiv j \left(\frac{|X_L||E_S|^2 - |X_S||E_R|^2}{(X_S + X_L)^2} \right)$$

변형된 유효전력 P 와 Q 의 식 (11)과 (12)를 이용하여 복소평면상에서 복소전력의 궤적을 추적하면 다음과 같은 식 (13)으로 표현 할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \left(\frac{P}{A}\right)^2 + \left(\frac{Q-\alpha}{B}\right)^2 = 1 \\ & \frac{P^2}{A^2} + \frac{(Q-\alpha)^2}{B^2} = 1 \quad (13) \end{aligned}$$

위의 식 (13)은 다음 그림 2와 같은 (0, α)를 중점으로 하는 복소평면상의 A와 B가 같지 않은 타원의 방정식 형태로 표현된다.

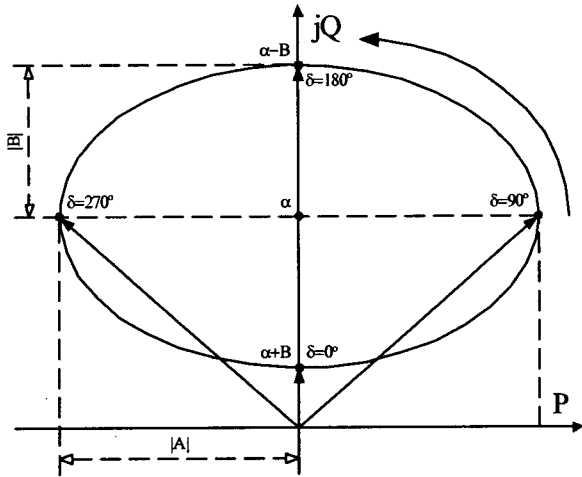


그림 2 복소평면상에서 타원의 방정식 형태로 표현된 복소 전력의 궤적
Fig. 2 Complex power locus on a complex plain(elliptical form)

식 (13)의 A, B와 a는 선로 정수와 양단간 전원의 크기에 따라 결정됨을 식 (11)과 식 (12)를 통하여 확인할 수 있으며 A는 항상 양이며 B는 $X_S > X_L$ 일 경우 양, $X_S < X_L$ 일 경우 음이 됨을 확인할 수 있다. 또한 $\frac{X_L}{X_S} > \frac{E_R^2}{E_S^2}$ 일 경우 a가 양이며 $\frac{X_L}{X_S} < \frac{E_R^2}{E_S^2}$ 이면 음이 됨을 확인할 수 있다.

2.2.2 고장발생시 복소전력의 궤적

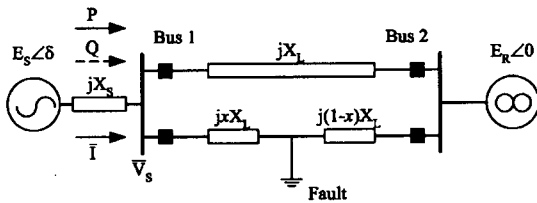


그림 3 1기 무한모선 병행선로 계통 모델
Fig. 3 OMIB system with two parallel lines

위 그림 3은 1기 무한모선 병행선로 계통 모델이다. 고장이 발생하기 전에 모선1과 모선2 사이의 병행선로 의 임피던스는 $\frac{jX_L}{2}$ 이며 전원 임피던스와 선로 임피던스 사이의 비율인 $k_{2,pre-fault}$ 는 $\frac{X_L}{2X_S}$ 로 양단 전원 사이의 비율인 $k_{1,pre-fault}$ 는 $\frac{E_R}{E_S}$ 이다. 이후 고장이 발생할 경우 모선1과 모선2 사이의 병행선로 임피던스는 jX_L 이 되며 고장 발생 이후, 양단 전원사이의 비율인 $k_{1,post-fault}$ 와 $k_{2,post-fault}$ 는 다음 식 (14), (15)와 같다.

$$k_{1,post-fault} = \frac{E_R}{E_S} = k_{1,pre-fault} \tag{14}$$

$$k_{2,post-fault} = \frac{X_L}{X_S} = 2k_{2,pre-fault} \tag{15}$$

위 식들을 이용하여 고장 발생 시, 양단 전원의 비율은 변하지 않으나 고장 발생 이후의 전원 임피던스와 선로 임피던스의 비율이 고장 발생 전에 비하여 두 배로 증가함을 확인할 수 있다.

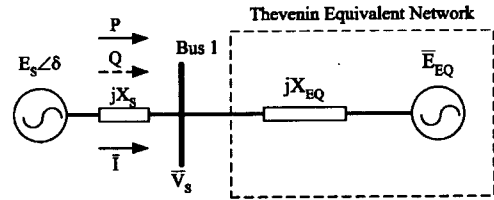


그림 4 3상 고장 발생 시 1기 무한 모선 계통 테브닝 등가모델

Fig. 4 Thevenin equivalent network when a three-phase fault occurs

위 그림 4는 모선 1에서 x 만큼 이격된 지점에서 3상 고장이 발생한 경우의 그림 3을 테브닝 등가모델로 표현한 그림이다. 그림 4에서 표현된 테브닝 등가전압 \overline{E}_{EQ} 와 등가 임피던스 jX_{EQ} 는 다음 식 (16), (17)과 같이 표현할 수 있다.

$$\overline{E}_{EQ} = \frac{xX_L}{X_L + xX_L} E_R \angle 0 = E_R \angle 0 \frac{x}{1+x} \tag{16}$$

$$jX_{EQ} = jX_L \parallel jxX_L = jX_L \frac{x}{1+x} \tag{17}$$

위 식 (16)과 (17)을 이용하여 양단 전압 3상고장 발생 시 양단 전원의 비율인 $k_{1,fault}$ 와 선로 임피던스의 비율인 $k_{2,fault}$ 는 다음 식 (18), (19)로 표현할 수 있다.

$$k_{1,fault} = \frac{E_R}{E_S} \frac{x}{1+x} = k_{1,pre-fault} \left(\frac{x}{1+x} \right) \tag{18}$$

$$k_{2,fault} = \frac{X_L}{X_S} \frac{x}{1+x} = k_{2,pre-fault} \left(\frac{2x}{1+x} \right) \tag{19}$$

$k_{1,fault}$ 과 $k_{2,fault}$ 는 $\frac{1}{1+x}$ 이 0부터 1의 범위 이내 이므로 $k_{1,pre-fault}$, $k_{2,pre-fault}$ 와 같거나 작다.

다음 그림 5는 고장 발생 전, 고장 발생 후 복소전력의 궤적과 고장 발생 중 고장거리가 변화할 경우 복소전력의 궤적을 보여주고 있다.

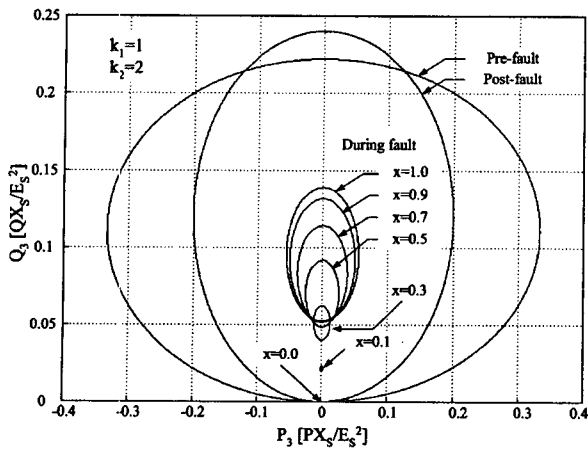


그림 5 고장 발생 전, 후 및 고장 발생 시 거리에 따른 복소 전력의 궤적
 Fig. 5 The trajectory of the complex power before a three-phase fault, after fault and during the fault for different fault distant x

위 그림 5에서 확인할 수 있듯이 고장이 발생하는 경우 고장 발생 전에 비하여 궤적의 크기가 크게 감소하며 고장 거리가 짧을수록 궤적의 크기가 감소함을 확인할 수 있다. 고장선로가 차단되어 고장이 제거된 경우 궤적의 크기가 즉각적으로 증가하나 고장 이전에 비하여 유효전력이 감소되어 있음을 확인할 수 있다.

3. 상차각 변화

3.1 등면적법에 의한 과도안정도 평가

동기발전기와 관련된 운동방정식은 다음 식 (20), (21)과 같다[5-6].

$$M \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = P_M - P_E = P_A \quad (20)$$

$$\delta = \frac{p}{2} \delta_m \quad (21)$$

- 여기서, P_M : 터빈의 기계적 입력
- P_E : 발전기의 전기적 출력
- P_A : 가속전력
- M : 관성 모멘트
- δ_m : 발전기 로터각
- δ : 전기적 상차각
- p : pole의 갯수

1기 무한 모선 계통에서 유효전력 P 는 양단 전원과 선로 임피던스를 이용하여 다음 식 (22)와 같이 표현할 수 있다[5-6].

$$P = \frac{E_S E_R}{X_S + X_L} \sin \delta = P_{MAX} \sin \delta \quad (22)$$

식 (20)이 2차 비선형 미분 방정식의 형태로 표현되기 때문에 직접 해를 구하기는 매우 어렵다. 따라서 식 (22)를 이용하여 표현된 다음 그림 6과 같은 그래프를 이용하여 해의 특성을 근사적으로 이용할 수 있다.

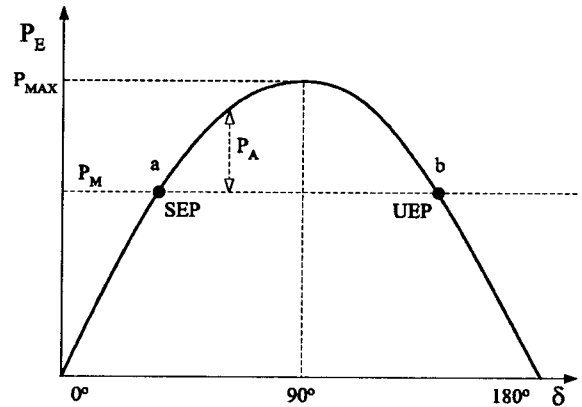


그림 6 전력-상차각 곡선
 Fig. 6 The power-angle curve

일반적으로 발전기는 그림 6의 a지점인 SEP(Stable Equilibrium Point)지점에서 전기적 출력 P_E 와 발전기 로터에 의한 기계적 입력 P_M 이 동일한 지점에서 운전되고 있다. 만약 고장 같은 외란이 발생하는 경우 전기적 출력 P_E 는 급격하게 감소하는 반면 기계적 입력 P_M 은 천천히 감소하게 되므로 두 에너지의 불균형 현상이 발생하게 된다. 이러한 에너지 불균형 현상은 상차각의 증가, 감소를 야기하게 되며 상차각의 진동이 점차적으로 감쇠하여 SEP 지점으로 수렴하는 경우를 전력동요 현상이라 한다. 다음 그림 7은 상차각의 진동이 점차 감소하여 ① 지점인 SEP로 수렴하는 전력동요 현상의 예이다.

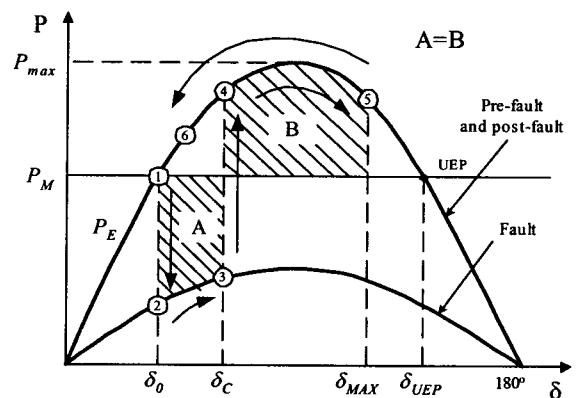


그림 7 안정된 경우의 전력-상차각 곡선
 Fig. 7 Power-angle curve in the case of a stable swing

반면에 상차각의 진동이 점차 증가하여 전력-상차각 곡선이 UEP(Unstable Equilibrium Point) 지점을 초과하게 되는 경우를 동기탈조현상이라 한다. 이 경우 전력-상차각 곡선은 다음 그림 8과 같다[3-6].

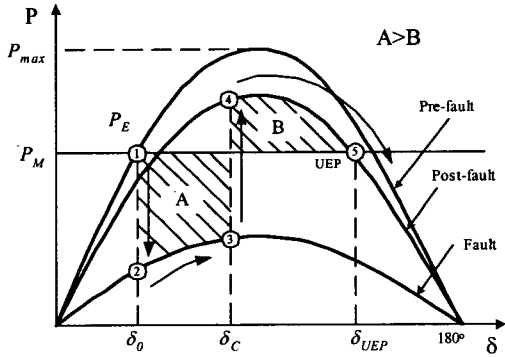


그림 8 불안정한 경우의 전력-상차각 곡선
Fig. 8 Power-angle curve in the case of an unstable swing

4. 시뮬레이션 결과

4.1 시뮬레이션 방법

다음 그림 9는 복소전력 궤적의 수학적 분석을 검증하기 위하여 ATP/EMTP MODELS를 이용한 시뮬레이션에 사용된 계통도이다. 계통 전압은 345kV이고 Relay는 BUS1에 연결되어 있다. BUS1과 BUS2의 초기 상차각은 30°이며 1번 선로의 F1지점에서 3상 고장을 발생시켰다. 계통상에 사용된 발전기 G1은 EMTP Type-59 동기기 모델과 TACS를 사용한 조속기, 여자기 모델을 사용하여 22kV 전압과 6300MVA 용량의 울진 N/P를 모델링 하였다[10-11].

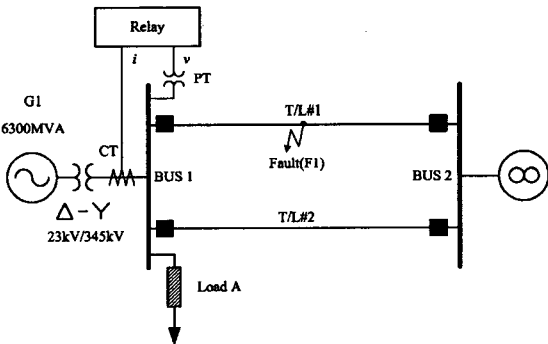


그림 9 시뮬레이션에 사용된 1기 무한모선계통 모델
Fig. 9 Simulation test model of OMIB

4.2 시뮬레이션 결과

4.2.1 3상 고장 발생 시 복소전력의 변화

시뮬레이션 시작 후 1초 후에 선로의 50% 지점이 되는

지점에서 고장이 발생하였고 3주기 동안 지속되었다. 선로길이가 100km일 경우 복소전력의 궤적은 그림 11과 같다. 그림 10에서 볼 수 있듯이 선로의 길이가 100km일 경우 동기탈조 현상은 3번 진동한 후 발생한다.

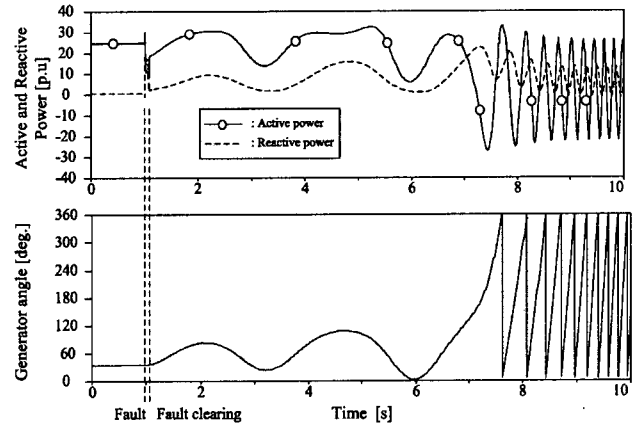


그림 10 3상 고장 발생시 시간에 따른 유효전력, 무효전력과 발전기각의 변화
(선로길이 100km, 선로 50%지점 고장, 고장 지속시간 3주기)
Fig. 10 The active power, reactive power and generator angle when a three-phase fault occurs
(Line length 100km, 50% fault, fault clearance after 3 cycles)

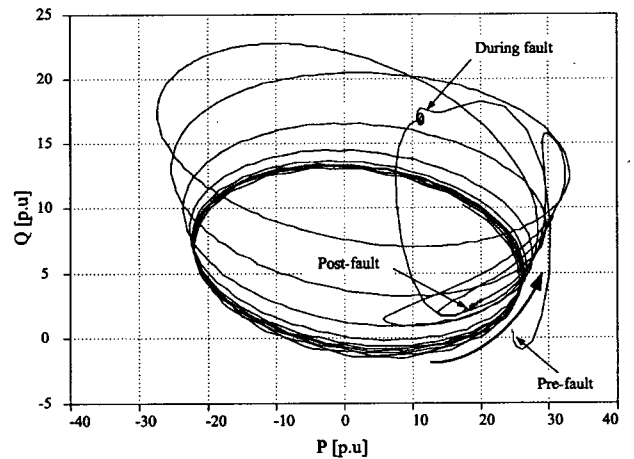


그림 11 3상 고장 발생시 복소전력의 궤적 변화
(선로길이 100km, 선로 50%지점 고장, 고장 지속시간 3주기)
Fig. 11 The trajectory of the complex power when a three-phase fault occurs
(Line length 100km, 50% fault, fault clearance after 3 cycles)

4.2.3 고장 발생 시 복소전력의 궤적

시뮬레이션 시작 후 1초 후에 100km 선로의 30%, 50%, 70% 지점에서 3상 고장이 발생하였고 3주기 동안 지속되었다. 다음 그림 12는 이러한 3가지 경우의 복소전력의 궤적을 하나의 평면에 표현한 그림이다. 그림 12를 이용하여 그림 5에서 나타난 것처럼 고장거리가 짧을수록 복소전력의 궤적의 크기가 작아짐을 확인할 수 있다.

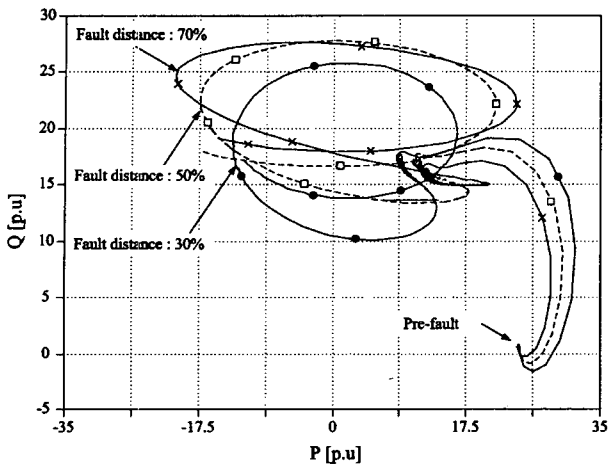


그림 12 3상 고장 발생시 복소전력의 궤적
(선로길이 100km, 선로 50%지점 고장, 고장 지속시간 3주기,
고장거리 30%, 50%, 70%)

Fig. 12 The trajectory of the complex power when a three-phase fault occurs
(Line length 100km, 50% fault, fault clearance after 3 cycles, fault distance is 30%, 50%, 70%)

5. 결 론

본 논문에서는 고장 등에 의한 외란현상 발생시 상차각 진동현상에 따른 복소전력의 궤적을 수학적 방법을 이용하여 분석하였다. 복소전력의 궤적을 타원의 방정식 형태로 유도 하였으며 고장 발생 전, 고장 발생 시, 고장 발생 후의 복소전력의 궤적 변화를 수학적으로 분석하였다.

본 논문에서는 제시한 수학적 이론을 증명하기 위하여 ATP/EMTP를 이용한 계통 모델에 적용하여 이론의 실제성을 검증 하였다.

결과적으로 본 논문에서 제시된 복소전력 궤적의 새로운 수학적 이론은 복소전력의 궤적을 이용하여 동기탈조 현상을 검출할 수 있는 새로운 동기탈조 검출 알고리즘의 개발에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

- [1] IEEE PSRC Working Group C-6, "Wide Area Protection and Emergency Control", IEEE PES Power System Relaying Committee, 2002.
- [2] V. Centeno, A. G. Phadke, A. Edris, J. Benton, M. Gaudi, G. Michel, "An Adaptive Out-of-Step Relay", IEEE Trans. Power Delivery, vol. 12, No. 1, pp. 61-71, Jan. 1997.
- [3] Demetrios Tziouvaras, "Power System Stability and Relaying", IEEE PSRC Meeting, Jan. 2003.
- [4] V. Van Acker, et al, "System Protection Schemes in Power Networks", CIGRE SCTF 38.02.19, 2000.
- [5] Jan Machowski, Janusz W. Bialek, James R. Bumby, Power System Dynamics and Stability, John Wiley & Sons inc.,1998, pp.215-234.
- [6] P. M. Anderson, Power System Protection, IEEE Press, 1997, pp. 853-905.
- [7] Chul-Hwan Kim, Myung-Hee Lee, R. K. Aggarwal, A. T. Johns, "Educational Use of EMTP MODELS for the Study of a Distance Relaying Algorithm for Protecting Transmission Lines", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 15,no. 1, pp. 9-15, Feb. 2000.
- [8] J.Y. Heo, C.H. Kim, R.K. Aggarwal, "Simulation of the Distance Relay using EMTP MODELS", KIEE International Transactions on Power Engineering, vol. 4-A, no. 1, pp. 26-32, Mar. 2004.
- [9] C. H. Kim, J. Y. Heo, R. K. Aggarwal, "An Enhanced Zone 3 Algorithm of a Distance Relay using Transient Components and State Diagram", IEEE Tran. on Power Delivery, vol. 20, no. 1, pp. 39-46, Jan. 2005.
- [10] Sang-Pil Ahn, Chul-Hwan Kim, R. K Aggarwal, A. T. Johns, "An Alternative Approach to Adaptive Single Pole Auto-reclosing in High Voltage Transmission Systems based on Variable Dead Time Control", IEEE Tran. on Power Delivery, vol. 16,no. 4,pp. 676-686, Oct. 2001.
- [11] Chul-Hwan Kim, Hyun Kim, Young-Hun Ko, Sung-Hyun Byun, R. K. Aggarwal, A. T. Johns, "A Novel Fault-detection Technique of High-Impedance Arcing Faults in Transmission Lines using the Wavelet Transform", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 17,no. 4, pp. 921-929,Oct. 2002.

저 자 소 개



권 오 상 (權 五 相)

1978년 1월 13일생. 2003년 성균관대 정보통신공학부 졸업. 현재 동 대학원 전자전기공학과 석사과정, 차세대전력기술연구센터

Tel : 031-290-7166
Fax : 031-290-7955
E-mail : dinosur@hanmail.net



김 철 환 (金 喆 換)

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

Tel : 031-290-7124
Fax : 031-290-7179
E-mail : chkim@skku.edu