

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

권오상*, 김철환*, 박남욱**, 채영무***

성균관대학교*, 차세대전력기술연구소*, 한국전기연구원**, 충주대학교***

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

O.S. Kwon*, C.H. Kim*, N.O. Park**, Y.M. Chai***

Sungkyunkwan University*, NPT Center*, KERI**, Chungju National University***

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.

1. 서 론

현대 산업시대에서 전기품질과 계통의 안정성은 증대 한 하나의 문제로 떠오르고 있다. 따라서 전력 계통에서 안정도에 영향을 미치는 고장에 의한 동기탈조 현상의 발생은 조기에 발견되고 저지되어야 한다[1-5].

본 논문은 과도 상태에 의한 전력동요 현상과 동기탈 조 현상 발생 시, 복소전력의 변화를 수학적으로 분석하 는데 그 목적이 있다. 복소평면상에서 복소전력의 궤적 을 수학적으로 모델링하고 이를 이용하여 전력동요 현상 과 동기탈조 현상 발생 시, 발전기 각 변화에 따른 복소 전력의 궤적을 수학적으로 분석하고, 제시된 이론에 따 라 실제 계통을 간략화한 시뮬레이션 모델을 통하여 전 력동요현상과 동기탈조 현상 발생시의 복소전력의 궤적 을 ATP/EMTP MODELS를 이용하여 시뮬레이션 하였 다[6-8].

2. 복소전력의 특성

2.1 동기탈조현상과 전력동요현상

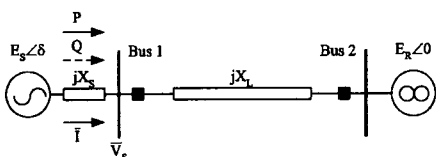


그림 1 1기 무한 모선 계통

전력계통에서 고장이 발생하거나 급격한 부하변동 등 으로 인한 전압 또는 주파수가 일정 범위를 벗어날 때 과도상태 심화에 따른 발전기의 가속, 감속에 의하여 발 생되는 현상을 전력동요 현상이라 하며 전력동요 현상이 심화되어 동기 상태에서 운전이 불가능하게 되는 경우를 동기탈조 현상이라 한다. 이러한 동기탈조 현상이 발생 하는 이유는 과도한 외란에 의하여 계통에서 한 발전기 는 가속되는 반면 다른 발전기는 감속되므로 두 발전기 사이에 동기기 탈조가 발생하기 때문이다. 그림 1과 같 은 1기 무한 모선 모델에서 유효전력 P와 무효전력 Q는 양단 전압 $E_S \angle \delta$ 과 $E_R \angle 0$ 간의 상차각 δ 에 의하여 결 정되며 상차각 δ 는 동요방정식에 의하여 결정된다[5-6].

2.2 상차각에 따른 복소전력

그림 1과 같은 1기 무한 모선 계통의 BUS1에서 측정 된 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.

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

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.

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

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

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

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.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

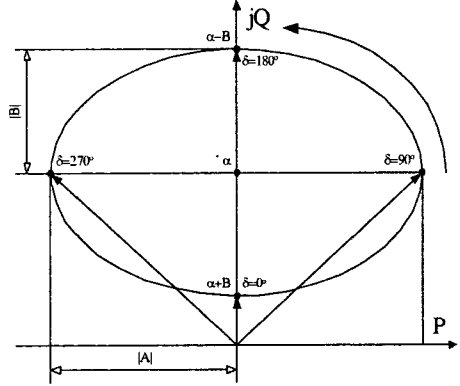


그림 2 복소평면상에서 타원의 방정식 형태로 표현된 복소전력의 궤적

식 (13)의 A, B와 α 는 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 α 가 양이며 $\frac{X_L}{X_S} < \frac{E_R^2}{E_S^2}$ 이면 음이 됨을 확인할 수 있다.

3. 시뮬레이션

3.1 시뮬레이션 방법

다음 그림 3은 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[9-10].

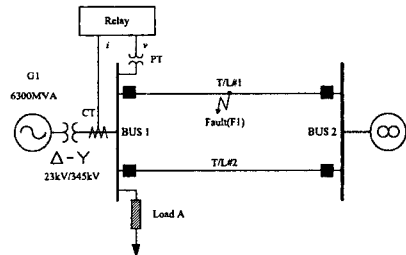


그림 3 시뮬레이션에 사용된 1기 무한모선계통 모델

3.2 동기탈조 현상 발생 시 복소전력의 변화

시뮬레이션 시작 후 1초 후에 선로의 50% 지점이 되

는 지점에서 고장이 발생하였고 3주기 동안 지속되었다. 3상 고장이 발생하였을 경우 유효전력과 무효전력은 다음 그림 4와 같다. 또한 선로길이가 100km일 경우 복소전력의 궤적은 그림 5와 같다. 그림 4에서 볼 수 있듯이 선로의 길이가 100km일 경우 동기탈조 현상은 3번 진동한 후 발생한다.

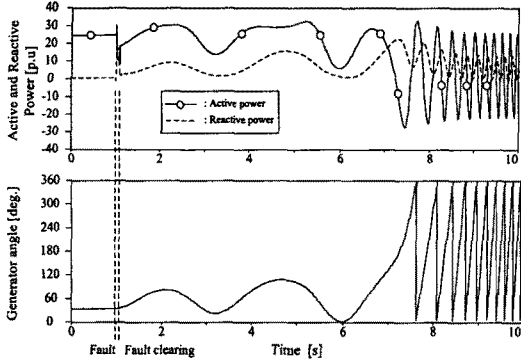


그림 4 3상 고장 발생시 시간에 따른 유효전력, 무효전력과 발전기각의 변화
(선로길이가 100km, 선로 50%지점 고장, 고장 지속시간 3주기)

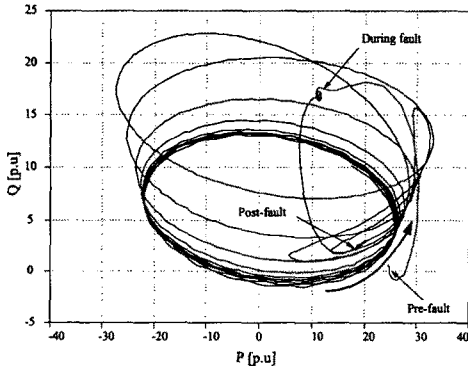


그림 5 3상 고장 발생시 복소전력의 궤적 변화
(선로길이가 100km, 선로 50%지점 고장, 고장 지속시간 3주기)

5. 결 론

본 논문에서는 고장등에 의한 외란현상 발생시 상차각 진동현상에 따른 복소전력의 궤적을 수학적 방법을 이용하여 분석하였다. 복소전력의 궤적을 타원의 방정식 형태로 유도 하여 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.

- [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] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.