

모델 전력 시스템의 전압붕괴 현상에 분기이론 제어 기법의 적용

김태현, 오태규, 국경수, 문영환
한국전기연구원

Application of bifurcation control to voltage collapse in a model power system

Taihyun Kim, Tae-kyoo Oh, Kyungsoo Kook, Younghwan Moon
KERI

Abstract - 이 논문에서는 모델 전력 시스템 전압붕괴 현상에 대한 선형과 비선형 제어 기법을 제안하였다. 선형 제어기를 통한 전압붕괴의 지연을 성취하였고 비선형 제어 기법을 통한 새로운 주기해의 안정을 성취하였다.

1. 서 론

전력 시스템에서의 전압 붕괴는 사회적인 파급 효과와 그 현상의 복잡성으로 인하여 중요한 연구 주제가 되어 왔다. 이런 전압 붕괴의 해석을 위하여 여러 연구진에 의하여 다양한 방법이 시도되었다.

이런 연구 중에 Dobson 과 Chiang은 [1] 전압 붕괴가 시스템 동특성의 변화에 의해 발생하는 현상으로 이해 될 수 있음을 보여주었다. 이 논문은 이런 동특성의 변화가 부하 측의 무효 전력 요구량 증가와 관련 있음을 보여 주었다. 더하여, 이 논문에서는 모델 전력 시스템을 이용하여 전압 붕괴가 평형점들의 saddle-node 분기점과 (bifurcation point) 일치함을 보여 주고 분기 이론을(bifurcation theory) 통하여 전압 붕괴를 해석 하였다. Ajarapu 과 Lee는[4] 같은 모델을 이용 분기 변수 공간에서 Hopf 분기가 saddle-node 분기에 앞서 일어남을 보여 주었다. 이후 Wang 등은 [5] 변수 값이 다른 같은 전력 시스템 모델의 자세한 분기 이론 해석을 하였다. 이 논문에서 그들은 단순한 Hopf 분기와는 다른 전압 붕괴에 이르는 다양하고 복잡한 동적 현상을 (period doubling, boundary crisis, 등) 발견하였다.

이 논문에서는 모델 전력 시스템에서 전압 붕괴 현상을 다루는 새로운 기법을 제시하고자 한다. 여기서, 새로운 기법의 의미는 [3]에서와는 다른 제어기들을 (actuators) 이용하는 것을 의미한다. [3]에서는 부하 전압 동적 특성에 직접 영향을 끼치는 제어 입력을 고려 하였다. 이런 부하 측 제어 입력 구현을 위해서는 일반적으로 STACOM과 같은 새로운 기기의 추가가 필요하다. 그러나 이런 추가 기기는 경제, 환경 등의 이유로 구현하기가 쉽지 않다. 그러므로 여기서는 기존의 기기만으로 구현 가능한 새로운 제어 기법을 소개 하고자 한다.

이 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2.1에서는 모델 전력 시스템의 소개와 분기이론을 이용한 모델 전력 시스템의 해석을 수행한다. 2.2에서는 제어 기법을 소개 하고 이런 제어 기법을 이용한 시간 시뮬레이션을 보여 준다. 3은 결론으로 구성되어있다.

2. 본 론

2.1 모델 전력 시스템과 이의 분기 해석

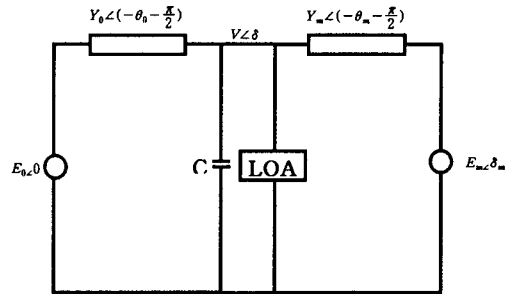


그림 1 모델 전력 시스템

이 절에서는 이 논문에서 사용 될 모델 전력 시스템에 대하여 알아본다. 그림 1은 발전기 일기가 비선형 부하와 무한모선에 연결되어 있는 모델 전력 시스템을 보여주고 있다. 이 그림의 주어진 모델을 묘사하는 비선형 동적 방정식은 아래와 같이 주어진다(자세한 내용은 [1]을 참조).

$$\delta_m = \omega \quad (2.1)$$

$$M\dot{\omega} = -d_m\omega + P_m + E_m Y_m V \sin(\delta - \delta_m - \theta_m) + E_m^2 Y_m \sin \theta_m \quad (2.2)$$

$$K_{qo}\dot{\delta} = -K_{qo}V^2 - K_{qo}V + Q(\delta, V) - Q_0 - Q_1 \quad (2.3)$$

$$TK_{qo}K_{pv}V = \frac{K_{pv}K_{qo}V^2}{(K_{pv}K_{qo} - K_{qo}K_{pv})V} + K_{qo}(P(\delta, V) - P_0 - P_1) - K_{pv}(Q(\delta, V) - Q_0 - Q_1) \quad (2.4)$$

여기서, δ_m 과 ω 는 각각 발전기 위상각과 각 속도를 나타 내고 δ 과 V 는 부하에 걸리는 전압과 이의 위상각을 나타낸다. 여기서, 부하에 공급되는 유효와 무효 전력은 ($P(\delta, V)$ 와 $Q(\delta, V)$) 아래와 같이 주어진다.

$$P(\delta, V) = -E_0' Y_0' V \sin(\delta + \theta_0') - E_m Y_m V \sin(\delta - \delta_m + \theta_m) + (Y_0' \sin \theta_0' + Y_m \sin \theta_m) V^2$$

$$Q(\delta, V) = E_0' Y_0' V \cos(\delta + \theta_0') + E_m Y_m V \cos(\delta - \delta_m + \theta_m) - (Y_0' \cos \theta_0' + Y_m \cos \theta_m) V^2$$

여기서 Q_1 이 분기 변수이며 이 값은 부하 쪽의 무효 전력 요구량을 의미한다. 각각 변수들의 값은 다음과 같다.

이 주어진 모델 전력 시스템의 분기 해석을 AUTO97 프로그램을([6]) 이용하여 다음의 분기 도형 (bifurcation diagram)을 얻었다.

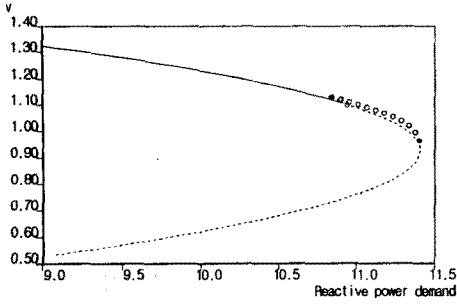


그림 2 모델 전력 시스템의 분기 도형

위의 그림에서 실선은 안정한 평형 점을 점선은 불안정한 평형 점을 나타낸다. 또한, 빈 원은 불안정한 주기 해를 검은색 원은 안정한 주기 해를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 Hopf 분기가 무효 전력 요구량이 (Q_1) 증가함에 따라 10.946에서 일어남을 알 수 있다. 앞 절에서 언급한 바와 같이 모델 전력 시스템에서의 Hopf 분기는 subcritical case임을 그림은 보여 주고 있다. 모델 전력 시스템의 관점에서는 한계점을 지나면서 기존의 평형 점(운영 점)이 불안정하게 되고 기존 운영 점 주변에 안정된 평형 점 또는 주기 해가 존재하지 않으므로 전압 붕괴가 발생하였다고 할 수 있다. 이외에 그림은 saddle-node, cyclic fold 분기, 등 모델 전력 시스템의 다양한 비선형 현상이 발생함을 알 수 있으나 이 논문의 목적이 전압 붕괴의 제어이고 subcritical Hopf 분기의 발생으로 전압 붕괴가 일어나므로 자세한 해석은 생략하기로 한다.

2.2 전압 붕괴의 제어

이 논문에서는 두 가지 제어 입력을 사용하였다. 먼저, 발전기 각 속도 동적 방정식의(식 (3.2)) 기계적 입력 (P_m) 제어 입력으로 이용하였다. 여기서, 우리는 거버너를 이용한 발전기의 기계적 입력(P_m) 조정이 가능하다는 가정을 하였고 거버너의 동적 방정식은 문제의 단순화를 위하여 생략하였다. 앞의 서술한 근거에 따라 제어 입력을 수식으로 표현하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_m = \overline{P_m} + u$$

여기서 $\overline{P_m}$ 은 정상 운전 입력 값이고 u 는 제어 입력이다. 제어에는 여러 가지 방법이 있으나 여기서는 먼저 선형 제어를 고려하였다. 여러 feedback 상태 변수 중 ω 을 제어 입력으로 선택하였다. ω 을 제어 입력으로 선택한 이유는 기존의 발전기에서 쉽게 측정이 가능하기 때문이다. 더하여, 비선형 시스템의 특성상 상태 변수 feedback으로 사용하여, 인가하면 기존의 평형 점(운영 점) 값의 변화를 초래하게 되고 이는 시스템 전체에 악 영향을 끼칠 수 있다. 여기서 고려하는 모델 전력 시스템의 경우 발전기 각 속도의(ω) 경우 평형 점 값이 항상 0이므로 이를 상태 변수 feedback을 통하여 모델 전력 시스템에 인가하더라도 평형 점의 변화를 초래하지는 않는다. 위에 서술한 바에 근거하여 아래의 선형 제어를 고려하였다.

$$u = k_1 \omega$$

여기서 k_1 은 선형 제어 입력 이득으로 임의로 정하는 값이다.

다음 그림은 k_1 값은 -0.25로 설정하여 얻은 그림이다.

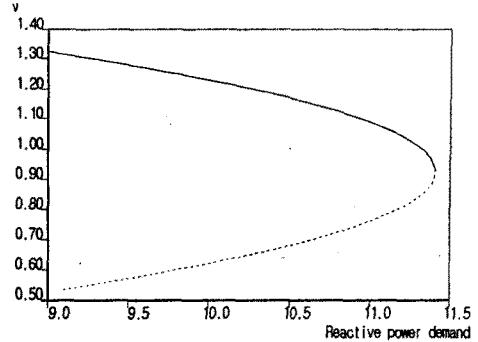


그림3. 선형 제어를 포함하는 분기 도형 ($k_1 = -0.25$)

이 그림은 선형 제어를 통하여 전압 붕괴를 nose-point 까지 지연 할 수 있음을 보여 주고 있다. 이 경우에 전압 붕괴는 Hopf 분기가 아니라 saddle-node 분기에 의해 일어남을 보여 주고 있다.

다음으로는 비선형 제어를 고려하였다. 앞에서 언급한 바와 같이 Hopf 분기에는 두 가지 종류가 있다. 먼저 supercritical case로 이 경우 분기점을 지나면 기존의 평형점이 안정성을 잃고 안정한 주기 해가 탄생하는 경우이다. 반대로 subcritical case의 경우 분기점을 지나면 기존의 평형 점 부근에 더 이상의 안정한 평형점이나 주기 해가 존재하지 않는다. 여기서 고려한 비선형 제어는 제어를 통하여 전압 붕괴에 대응하는 subcritical Hopf 분기를 supercritical Hopf 분기로 바꾸어 줌으로써 분기점 이후에도 기존의 평형 점 부근에 안정한 주기 해를 생성 전압 붕괴를 방지하는 것이다. 다음과 같은 비선형 제어를 고려하자.

$$u = k_n \omega^3$$

k_n 은 상수로써 임의로 정하는 제어 이득이다. 발전기 각 속도를 제어 입력으로 고려한 이유는 선형 제어에서 서술한 바와 같으며 3차의 차수를 제어 입력으로 고려한 이유는 Hopf 분기의 특성 변형은 비선형 영역에서 제어 가능한 경우 상태 변수의 3차 항 feedback으로 가능하기 때문이다(자세한 내용은[2]를 참조).

다음의 그림은 이 비 선형 제어를 포함하는 모델 전력 시스템의 분기 해석을 한 결과이다.

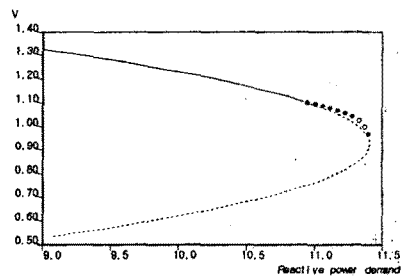


그림4. 비선형 제어를 포함하는 분기 도형 ($k_n = -0.5$)

위 그림에서 알 수 있듯이 Hopf 분기가 일어나는 지점은 비 제어 시와 동일하나 (즉, 동일 부하 즉 무효 전력 요구량에서 분기 발생) 이 Hopf 분기가 supercritical 형태로 바뀌었음을 알 수 있다.(그림에서 검은색 원) 이는 기존의 전압 붕괴 한계점을 지나고 나서도 안정한 주기 해가 기존 평형 점 (운영 점) 주변에 생성되어 전압 붕괴를 방지 할 수 있음을 보여 준다.

다음으로 발전기 끝단 전압을 (동적 방정식 (3.2)~(3.4)의 E_m 와 그림 1 참조) 제어 입력으로 이용하였다. 여기서, 우리는 AVR과 여자기를 이용한 발전기 끝단의 전압 (E_m) 조정이 가능하다는 가정을 하였고 AVR과 여자기의 동적 방정식은 문제의 단순화를 위하여 생략하였다. 앞의 서술한 근거에 따라 제어 입력을 수식으로 표현하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

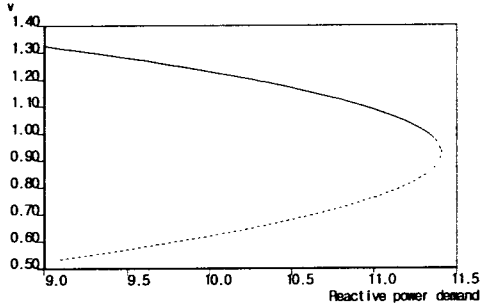


그림5. 선형 제어를 포함하는 분기 도형 ($k_l=0.025$)

선형 제어를 포함하는 모델 전력 시스템의 비선형 해석을 통하여 그림 5을 얻었다. 그림 3과 비교하여 이 경우에는 같은 제어 이득으로 nose-point까지 모델 전력 시스템의 전압 붕괴가 지연 되었음을 알 수 있다. 앞의 경우와 마찬가지로 비선형 제어를 이용하여 Hopf 분기의 subcritical에서 supercritical로의 변화를 고려하였다.

그림 6은 이 비선형 제어를 포함하는 모델 전력 시스템의 분기 해석을 한 결과이다. 이 그림은 모델 전력 시스템의 전압 붕괴가 nose-point 까지 지연되었음을 보여준다. 더하여 그림 5와 비교하여 발생한 주기 해의 크기가 작은 것을 알 수 있다. (그림에서 원과 선 사이의 거리) 이는 주기 해의 진폭이 작음을 의미하고 다시 이는 시스템 진동의 작음을 의미한다.

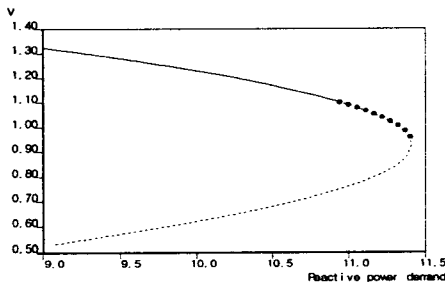


그림6. 비선형 제어를 포함하는 분기 도형 ($k_n=0.5$)

위의 결과를 통하여 전압 붕괴 제어를 위해서는 발전기 끝단의 전압 제어가 더욱 효과적임을 알 수 있고 이는 전압과 무효전력이 밀접한 관계를 가진다는 기존 연구 결과와 일치한다.

3. 결 론

이 논문에서는 모델 전력 시스템의 전압 붕괴 제어를 수행하였다. 분기 이론을 이용한 해석을 통하여 모델 전력 시스템의 전압 붕괴가 Hopf 분기로 이해 될 수 있음을 보여 주었고 이의 제어 역시 분기 이론에 근거하여 수행하였다. 선형 제어를 통하여 전압 붕괴의 nose-point까지의 지연을 성취하였고 비선형 제어를 통

하여 Hopf 분기에 의해 생성되는 주기 해의 안정화를 이루었다. 기존의 연구와는 달리 현존하는 전력 시스템 기기를 이용하여 제어를 수행하였다. 이를 위해 제어 입력으로 거버너를 이용한 기계적 입력과 AVR과 여자기를 이용한 발전기 끝단의 전압을 이용하였다..

(참 고 문 헌)

- [1] I. Dobson and H.-D. Chiang, "Toward a theory of a voltage collapse in electrical power system", *Systems and Control Letters*, vol. 13, 1989, pp. 253-262
- [2] E. H. Abed and J.-H. Fu, "Local feedback stabilization and bifurcation control. I. Hopf bifurcation", *Systems and Control Letters*, vol. 7, 1986, pp. 11-17
- [3] H. O. Wang and E. H. Abed, "Control of nonlinear phenomena at the inception of voltage collapse", *Proceedings of the American Control Conference*, San Francisco, CA U.S.A., 1993, pp. 2071-2075
- [4] H. O. Wang, E. H. Abed, and A. M. A. Hamdan, "Bifurcations, chaos and crises in voltage collapse of a model power system", *IEEE Trans. on Circuits and Systems I*, Vol. 41, 1994, pp. 294-302
- [5] V. Ajjarapu and B. Lee, "Bifurcation theory and its application to nonlinear dynamical phenomena in a electrical power system", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 7, 1992, pp. 424-431
- [6] E. J. Doedel, "AUTO: A program for automatic bifurcation analysis of autonomous systems", *Cong. Num.*, Vol. 30, 1981, pp. 265-284