

과도안정도 측면에서의 발전 재배분을 이용한 예방 제어

최신규 이종석 이병준 권세혁 남해곤 추진부 이경극 윤상현
고려대학교 전남대 한전 전력연구원 (주)프로컴시스템

Preventive Control Using Generation Rescheduling for Transient Stability

Sun-Kyu Choi, Jongseock Lee, Byungjun Lee, Sae-Hyuk Kwon, H.K. Nam, J.B. Choo, Lee Koungguk, S.H. Yoon
Korea University Chonnam national university KEPRI KEPCO PROCOM Systems Co.,Ltd.

Abstract - This paper describes preventive control for transient stability. Preventive control encompasses in general a twofold problem : Severity assessment of a instability originating from the occurrence of a dangerous contingency, and Choice of an action able to stabilize it. In this paper we assess contingencies in a power systems using PASF(Power Angle Shape Filtering) and control power systems by a generation rescheduling. The proposed method is applied to prevent loss of synchronism of all the generators at a site, KEPCO Systems.

1. 서 론

우리나라의 경우 전력계통은 지역적, 경제적인 이유로 발전단지가 대규모화되어 있기 때문에 대규모 발전단지를 포함하는 지역계통에서 발전 단지의 인근 계통 사고가 전체 계통에 미치는 과급효과는 가중될 것으로 전망되며, 대규모 발전 단지가 있는 지역계통의 안정화에 대한 중요성의 인식이 증대되고 있다[1].

계통의 안정화를 위해서는 변동하는 계통 조건 하에서 다양한 상정사고들에 대한 계통의 안전도를 평가할 수 있는 동적 안전도 평가(Dynamic Security Assessment)가 수행되어야 한다[2].

본 논문에서는 과도 안정도(Transient Stability) 측면에서 예방 제어를 통한 계통의 안정화 방안을 마련하고자 다음과 같이 크게 두 단계의 과정을 사용하였다.

첫 번째 단계는 상정사고 평가로서, 최근 부각되고 있는 SIME(Single Machine Equivalent)법을 기반을 둔 상정사고 분석 방법인 PASF(Power Angle Shape Filtering)법을 이용하여 계통에 위협한 영향을 줄 수 있는 상정사고를 상세하게 분류하는 단계이다[3]. 또한, 이 단계에서 상정사고 평가 시 발전기 회전자 위상각을 고려한 위상각 변화 지수(Angle Variation Index)에 의해 운용중인 발전기들을 위험 발전기 군과 안전한 발전기 군으로 구별함으로써 제어 대상을 명확히 할 수 있다.

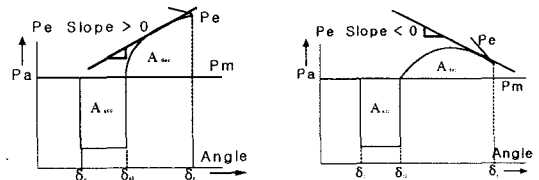
두 번째 단계는 발전 재배분(Generation rescheduling)량 산출이다. 본 논문에서는 계통의 시간모의를 통한 안정한 경우의 전력-상차각 곡선을 이용하여 안정이득을 구하고, 외삽법(Extrapolation)을 사용하여 재배분(제어)량을 산출하는 방법을 제안한다. 자세한 과정은 3장에서 설명하겠다. 위에서 제안된 방법을 통해 계산된 제어량을 실제계통에 예방 모드(Preventive Mode) 상태로 불안정한 상정사고에 대해 적용함으로써 타당성을 검증하였다.

2. 상정사고 평가

2.1 상정사고 선정 및 PASF

상정사고 선정은 예상되는 모든 상정사고를 고려하고, 상정사고들에 대한 분석을 통해 안정화 방안이 요구되는 위험한 상정사고에 대해서만 시간모의를 하는 것이 중요하다. 하지만, 계통 사고의 특성상 안정한 사고의 경우라도 (불)안정의 기준이 되는 임계값 부근에 존재한다면 정확한 상정사고 분류가 필요하게 된다. 따라서, 본 논문에서는 다음과 같은 PASF법을 이용하여 상정사고들을 평가하였다.

PASF법은 과도안정도 평가를 위한 시간 모의시 최초 설정된 CT1(Clearing Time1)에 의한 모의 결과, 안정한 것으로 판별된 사고는 매우 안정한 상정사고로 분류하고 불안정한 상정사고에 대해 조정된 CT2에 의해 시간 모의를 실시하여 불안정한 상정사고를 다시 매우 불안정한 경우, 일반적으로 불안정한 경우, 안정한 경우로 구별하고, 안정한 경우에 대해서는 다음과 같이 회귀각 부근의 Pe(전기적 출력)곡선 기울기를 관찰하여 사고유형을 세분화하였다[3]. 그림1의 (a)는 회귀각 부근에서 Pe곡선 기울기가 양이므로 무해한 상정사고로 분류하고, (b)는 음이므로 유해한 상정사고로 분류한다.



(a) 무해한 상정사고 (b) 유해한 상정사고
그림1. PASF법에 의한 안정한 상정사고 분류

2.2 AVI 지수(Angle Variation Index)에 의한 제어 대상 발전기 선정

상정사고 평가 시, 사고가 계통(발전기)에 미치는 영향을 잘 나타낼 수 있는 것이 바로 발전기의 회전자 위상각이다[4]. 이 절에서는 시간 모의 프로그램에 의한 모의 결과를 토대로 모든 발전기의 회전자 위상각을 식(1)과 같이 COA (Center Of Inertia)로 표현하고, 식(2)와 같은 방법으로 위상각 변화 지수(Angle Variation Index)에 의해 각 발전기들을 내림차순으로 정리하고, 위상각 차(Gap Criterion)를 이용하여 AVI 지수가 급격히 변화하는 지점에서 위험 발전기(제어대상) 군과 안전한 발전기 군을 결정한다.

$$\delta_{i_{COA}}(t) = \delta_i(t) - \frac{\sum_{k=1}^n M_k \delta_k(t)}{\sum_{k=1}^n M_k} \tag{1}$$

δ_i : 각 발전기의 회전자 위상각
 M_k : 각 발전기의 관성정수

$$AVI_i = \sum_{j=0}^T |\delta_{i_coa}(j+1) - \delta_{i_coa}(j)| \quad (2)$$

T : 관찰 시점

AVI_i : 각 발전기의 AV지수

3. 발전 재배분(제어)량 계산

AVI에 의해 발전기 군을 분류하고 PASF법에 의해 각 상정사고별 과도안정도 평가를 실시하여 상위 순위에 있는 불안정한 것으로 평가된 상정사고에 대해 발전 재배분량 계산한다. 재배분량 계산의 전체적인 개념은 그림2와 같고, 3.1절에서는 초기 제어량 선택에 관련된 개념과 수식을 설명하고, 3.2절에서는 초기 제어량을 이용하여 구한 첫 번째 안정 이득과 초기 제어량의 10%를 감소시켜 계산한 두 번째 안정 이득을 선형적인 관계로 근사화하여 최종적인 재배분량을 계산하는 외삽법에 대해 설명하겠다.

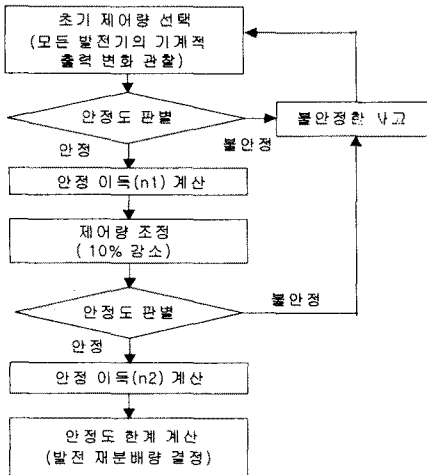


그림2. 재배분량 계산을 위한 순서도

3.1 초기 제어량 계산

정상 운전 상태에서 계통에 사고가 발생하면, 발전기들의 기계적 출력은 변화될 것이라 생각된다. 특히 위험한 발전기 군의 기계적 출력은 제어기들의 동작으로 감소될 것이며, 안전한 발전기 군의 경우는 약간 증가될 것이다. 이러한 생각에서 상정사고 판정 결과 불안정한 경우(그림3)에, 사고 발생 시점에서 사고 제거 시점까지의 위험 발전기 군과 안전한 발전기 군에 대한 기계적 출력 변화를 식(3)에 의해 계산하고, 그 값으로 전력-상차각 곡선의 기계적 출력 곡선의 변화량을 보상하여 안정한 경우(그림4)의 전력-상차각 곡선의 특성을 갖게 한다[4]. 즉, 가속면적과 감속면적이 같아지는 상차각 부근에서 회귀각(Returning Angle)이 존재하도록 한다.

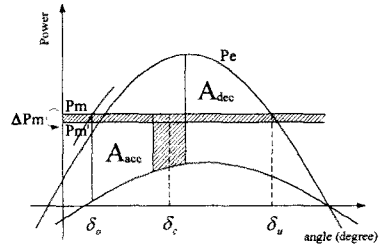


그림3. 불안정한 상정사고의 전력-상차각 곡선

$$-\Delta P_m = -\frac{M_N}{M_N+M_C} \Delta P_C + \frac{M_C}{M_N+M_C} \Delta P_N \quad (3)$$

ΔP_m : 초기 조절량(기계적 출력 변화의 총합)

ΔP_C : 위험 발전기군의 기계적 출력변화의 합

ΔP_N : 안전한 발전기군의 기계적 출력변화의 합

M_C : 위험 발전기군의 관성 정수의 합

M_N : 위험 발전기군의 관성 정수의 합

3.2 안정 이득 계산

3.1절의 초기 제어량으로 불안정한 상정사고가 안정화되어, 그림4와 같은 전력-상차각 곡선을 얻을 수 있다. 그림4와 같이 안정한 경우, 빗금친 부분에 해당하는 면적이 안정 이득으로서 P_e 곡선을 2차 함수로 근사화하여 예측에 의해 구한다.

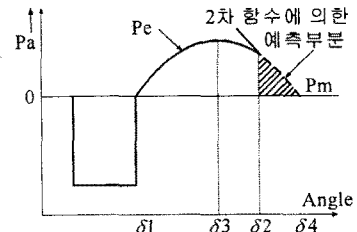


그림4. 회귀각(δ_2) 이후의 곡선 근사화

안정 이득은 식(4)와 같이 가속화력 P_a 의 적분에 의해 계산된다. 식(4)에서 적분구간 δ_2 는 안정한 상정사고 경우에 존재하는 회귀각이며, δ_4 는 P_e (전기적 출력)곡선과 P_m (기계적 출력)곡선이 교차하는 상차각이다. 즉, 현재의 안정한 계통이 사고 지속 시간에 대해 더 안정할 수 있는 여유 상차각이다.

식(4)의 δ_4 는 식(5)로 표현되는 P_e 곡선을 근사화한 2차 함수에서 P_a 를 기준 축으로 하고, P_e 의 값이 0일 때 두 개의 해 중에서 최대 값이다.

$$\eta_{st} = \int_{\delta_1}^{\delta_2} P_a d\delta = \int_{\delta_2}^{\delta_4} (P_m - P_e) d\delta \quad (4)$$

$$P_e(\delta) = a\delta^2 + b\delta + c \quad (5)$$

식(5)에서 $P_e(\delta)$ 와 δ 는 시간 모의 결과로 얻어지는 기지의 값이므로, 임의의 연속되는 세 점 $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ 에서의 $P_e(\delta_1), P_e(\delta_2), P_e(\delta_3)$ 값을 함수에 대입해서 계수 a, b, c를 구할 수 있다.

이와 같은 방법으로 초기 제어량의 10%를 감소시켜 두 번째 안정 이득을 구한다.

3.3 외삽법을 이용한 재배분(제어)량 결정(계산)

식(4)에 의해 계산된 두 개의 안정 이득을 외삽법을 이용하여 최종적인 재배분(제어)량을 예측한다. 그림5는 초기 제어량 Pm_1 과 10%를 감소한 Pm_2 를 사용하여 계산된 안정 이득 η_1, η_2 에 의해 실제 재배분(제어)량 Pm_C 를 구하는 방법을 설명하고 있다.

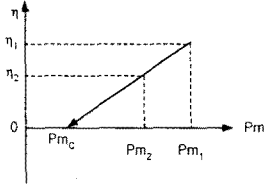


그림5. 외삽법에 의한 최종 재배분(제어)량 예측

4. 사례 연구

2.1절에서 소개한 상정사고 평가 기법인 PASF법을 이용하여 다음과 같은 조건에서의 상정사고들을 고려하였다.

- 2000년 5월 한전 계통 운용 데이터 (운영 발전기 : 174기, 모선 : 787모선)
- 상정사고 위치 : 345kV 모선(From), 3상 2회선 선로 (40개)
- 사고 시나리오 : 345kV 모선(From) 지락 사고 지속 (100ms)후, 3상 2회선 선로 중 1회선 Trip, 모선 지락 사고 제거(200ms)

4.1 PASF에 의한 상정사고 평가결과

표1의 결과와 같이 40개의 상정사고에 대한 스크리닝 결과 17개의 상정사고가 위험한 사고로 평가되었으며, 상정사고 중 원자력 발전기들을 포함하는 상정사고와 매우 위험한 상정사고(제어량이 계통 운용 관점에서 비현실적인 경우)는 제외하고, 유해한(PD) 상정사고의 경우 화력 발전기만을 포함하는 상정사고들('하동T/P3-의령3', '하동T/P3-광양345')을 제어 대상 사고로 선정하였다. 사고의 구별을 위해서 345kV 3상 1회선 Trip 선로의 명칭을 사용하였다.

표1. PASF법을 이용한 평가 결과

번호	사고 선로		판정 결과	CCT (ms)	위험 발전기군
	모선(From)	모선(To)			
1	하동T/P3	의령3	PD	184.2	하동 T/P(5기)
2	하동T/P3	광양345	PD	189.5	하동 T/P(5기)

(PD: Potentially Dangerous)

4.2 발전 재배분에 의한 과도안정도 향상

앞 절에서 선정된 상정사고('하동T/P3-의령3', '하동T/P3-광양345')에 대한 재배분(제어)량 계산 및 시간모의 결과를 제시한다(표2). 이 절의 결과는 다음의 가정 하에서 계통을 시간 모의하여 얻어진 결과이다.

- 단일 상정사고에 의한 위험 발전기 군의 과도안정도 (제1과 동요 안정도)를 고려함.
- 위험 발전기 군의 재배분에 의한 발전량 감소에 따른 전력 수급 조절은 슬랙(Slack) 발전기(삼천포3G)가 발

전함.

- 위험 발전기 군의 발전기들의 재배분(제어)량을 균등하게 배분함.

- 총 시간 모의 시간 : 5.0 초

위의 가정 중 발전량의 수급 조절을 위험 발전기 군과 전기적으로 인접해 있는 발전기 군으로 선정하였고, 특히, 현실성을 고려하여 발전 여유가 있는 발전기로 결정하였다.

표2에서 보는바와 같이 두 상정 사고에 대한 위험 발전기 군의 초기 제어량이 같음을 확인 할 수 있다. 이는 사고 시나리오에서 모선 사고가 계통에 미치는 영향이 지배적임으로 선로의 개폐는 발전기의 기계적 출력 변화에 큰 영향이 없기 때문이다.

표2. 제어 대상 사고에 대한 초기 제어량 및 안정이득

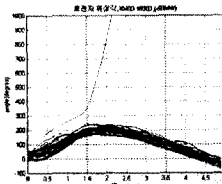
상정사고	하동T/P3-의령3 (10400-10300)	하동T/P3-광양345 (10400-7900)
모의결과		
ΔP_m (MW)	-72.3353	-72.3352
Pm_1 (MW), (η_1)	-73.0, (19.8623)	-73.0, (66.3494)
Pm_2 (MW), (η_2)	-65.7, (13.1523)	-65.7, (58.1626)

표3. 계산값과 모의 결과값에 의한 재배분량의 비교

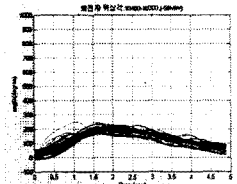
상정사고	하동T/P3-의령3 (10400-10300)	하동T/P3-광양345 (10400-7900)
모의결과		
Pm_C (계산값)	-51.392	-13.893
Pm_C (모의결과)	-58.0~-57.0	-12.0~-11.0
오차	6.11	2.4

단위 : MW

표2의 결과를 토대로 계산한 재배분(제어)량과 계산된 값을 실 계통에 적용하여, 시간 모의로 확인한 결과는 표3, 그림6, 그림7과 같이 시간 모의한 발전 재배분량의 입계값에 되어 발전기의 회전자 위상각이 발산 및 수렴한다.

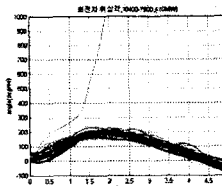


(a) -56.0 MW

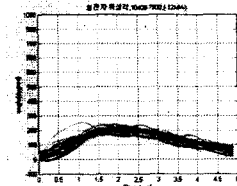


(b) -58.0 MW

그림6. 1번 상정사고에 대한 발전기 회전자 위상각



(a) -10.0 MW



(b) -12.0 MW

그림7. 2번 상정사고에 대한 발전기 회전자 위상각

그림6, 그림7에서 보는바와 같이 시간 모의를 통하여 정확한 제어량을 확인하였다. 본 논문에서 제안한 방법을 이용하여 계산한 결과 값과 시간 모의에 의한 결과

값의 오차가 재배분(제어)량의 값에 비해 매우 작음을 확인할 수 있다. 또한, 초기 제어량이 실제 제어량 보다 과도하게 계산되었는데 그 이유는 계통의 여러 가지 요인(손실, 전기적 거리, 두 발전기 군의 상대적 변화)들에 의한 것이라 생각된다.

4.3 전기적 거리를 고려한 차별 발전 재배분에 의한 과도 안정도 향상

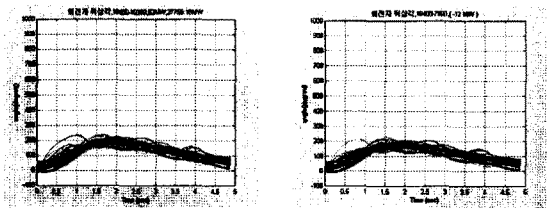
이 절에서는 4.2절에서 고려하지 않은 위험 발전기 군에 포함된 발전기들에 대해서 동기 탈조 정도에 따른 재배분량을 차별하여 계통의 제1과 동요 안정도 향상에 대한 사례 연구를 제시한다. 표4는 제안된 방법에 의해 계산된 제어량과 상정사고 평가 시, AV지수에 의해 동기 탈조 정도가 심한 발전기 순서에 의해 차별된 재배분량을 보여준다.

표4. 동기 탈조 정도에 의한 차별된 재배분량

상정사고 위험발전기	하동T/P3-의령3 (10400-10300)	하동T/P3-광양345 (10400-7900)
P_{mc} (계산값)	-51.392 MW (-58.0 MW)	-13.893 MW (-12.0 MW)
하동5G (27755)	-16.0 MW	-4.0 MW
하동4G (27754)	-9.0 MW	-2.0 MW
하동1G (27751)	-9.0 MW	-2.0 MW
하동3G (27753)	-9.0 MW	-2.0 MW
하동2G (27752)	-9.0 MW	-2.0 MW

위 표에서 ()안의 수치는 균등하게 재배분할 경우 시간 모의를 통한 위험 발전기 군의 총 재배분량이며, 위험 발전기의 정렬 순서는 동기 탈조의 심각성 정도에 따른 순서이다. 예를 들어, 하동5G는 두 상정 사고에 대해 동기 탈조 정도가 가장 심각한 발전기로 평가된다. 따라서, 차별된 재배분량 결정 시 가장 많은 양의 기계적 출력을 감소시키게 된다.

결론적으로, 위험 발전기 군내의 발전기들의 동기 탈조 정도를 고려한 재배분량의 결정이 보다 정확한 제어량을 산출하는데 중요한 요인으로 작용함을 검증할 수 있다. 그림8에 시간 모의의 결과를 제시한다.



(a) 하동5G(-16.0 MW) (b) 하동5G(-4.0 MW)
그림8. 두 상정사고에 대한 차별된 재배분에 의한 결과

5. 결 론

본 논문에서는 전력 계통의 과도안정도 측면에서, 상정 사고에 대한 계통의 제1과 동요 안정도 향상을 위해 위험 발전기 군과 안전한 발전기 군의 발전 재배분을 통해 예방 제어 차원에서 실계통에 적용해 보았다. 결과적으로, 본 논문에서 제안된 두 개의 안정 이득을 이용한 재배분량 산출을 통해 계통의 제1과 동요 안정도가 향상됨을 검증하였다.

향후에 연구되어야 할 사항은 다음과 같다.

- 단일 상정사고에 의해 계산된 재배분량을 이용하여, 여러 개의 동시 상정사고에 대한 실질적인 재배분량 산출 및 경제성을 고려한 발전 재배분.
- 계통에 설치되어 있는 보호 장치들의 투입 여부에 의한 실제적인 재배분량 산출.

(참 고 문 헌)

[1] Taekyoo Oh, Hakman Kim, Changmoo Kim, Hyeunkeun Rju, "Stabilizing scheme application for improving power system security in Korea", Power Engineering Society Winter Meeting, IEEE, Page(s): 90 -93 vol.1, 2000
 [2] CIGRE Task Force 38-02-13, 'New Trend and Requirement for Dynamic Security Assessment', 1997
 [3] 이종석, 양정대, 이병준, 권세혁, 남해곤, 추진부, 윤상현, 박병철, "온라인 과도안정도 판정을 위한 고속 스크리닝 알고리즘 개발", 대한전기학회, 2001년 5월호 (계재 예정)
 [4] M. Pavella, "Transient Stability of Power Systems", Kluwer Academic Publishers, 2000