

CCT 변화를 이용한 중요선로의 안정도 평가

김종보 이종석 이병준 권세혁
고려대학교

The Stability Assessment of The Critical Transmission Line using CCT

Jongbo Kim, Jongsoek Lee, Byungjun Lee, Sae-Hyuk Kwon,
Korea University

Abstract - Power system stability assessment is a major requirement for safe operation of a power system. When the disturbance occurs, the power system transient stability is defined as the operating condition can return to steady state with getting over it. According to the system structure and the operating conditions, system instability is revealed in various shape. And as we know the result of transient stability analysis depends on the system load. In this paper, we've tried to know how much CCT is influenced as the system load changes. Therefore, comparing with CCT we can calculate the P_m that we can generate more in stable state.

1. 서 론

최근 우리나라 전력계통은 지속적인 경제성장과 정보화 산업의 발달로 산업 활동분야에서는 물론 사회생활 전 분야에서 전기에너지에 대한 의존도가 높아지면서 전력 수요가 급속히 성장하고 이에 부응하여 대규모 시스템으로 성장, 발전하고 있다. 또한 전기 이용 측면에서는 국민 생활수준의 향상과 컴퓨터 등 정보화 기기의 사용이 보편화되면서 양질의 전기를 신뢰도 높게 공급할 것을 요구하고 있다. 그러나 전력 산업 구조의 개편에 의해 앞으로는 지금까지의 공공성보다는 기존의 설비를 가지고 전력 송전의 한계를 증가시키는 경제적인 측면이 많이 대두될 것이다. 이에 따라 송전망에 중대 사고가 발생할 가능성이 과거보다 높아질 것이다. 특히, 가혹한 사고에 의해 대용량발전기군이 주계통으로부터 동기탈조하는 과도안정도 문제는 단순히 대전원이 탈락하는 것 뿐 만아니라 나머지 계통에도 동요가 파급될 가능성이 있고 계통운용의 면에서도 중요한 과제이다.

전력계통 안정도는 계통에 외란이 발생하였을 때 이를 극복하고 정상 운전상태로 복귀하는 계통특성으로 정의된다. 계통 불안정은 계통구성과 운전조건에 따라 여러 가지 형태로 나타난다. 우리는 계통의 부하 수준에 따라 안정도 해석 결과가 많이 틀려지는 것을 알고 있다. 본 논문에서는 발전기의 출력 변화 또는 발전단의 새로운 발전기 투입에 따른 임계고장 제거시간(CCT: Critical Clearing Time)의 변화를 관찰하여 적용되어진 송전선로에서의 일반적인 고장제거시간(CT: Clearing Time)과 비교, 그 선로에 영향을 미칠 수 있는 중요 발전단의 안전 발전 증가 가능량을 미리 예측하고자 한다.

2. CCT와 발전기 출력

2.1 부하와 CCT의 관계
일반적으로 계통을 등가 1기 무한모선으로 나타냈을 때의 동특성은 식 (1)의 동요방정식으로 표현된다.

$$M\ddot{\delta} = M\dot{w} = P_m - P_{\max}\sin\delta = P_a \quad (1)$$

P_a : 등가 1기무한 모선의 가속화력

식(1)을 이용하여 그림1과 같은 등면적법 곡선을 그릴 수 있는데 A_{acc} 는 사고 중 δ 의 가속 영역을 A_{dec} 는 사고제거 후 감속영역을 나타낸다. 여기에서 계통이 안정해지기 위해서는 $A_{acc} < A_{dec}$ 를 만족해야한다. 이것은 사고제거 후 과도 에너지는 감속력의 작용으로 운동에너지는 위치에너지로 변환되어 계통에 의해 흡수되는데 이때 안정한 경우는 운동에너지가 전부 위치에너지로 변화·흡수되며, 그렇지 못한 경우는 불안정하게 된다.

계통의 부하는 일정하지 않고 항상 변화한다. 따라서 P_m 도 변화하게 된다. 그림1에서 보는 것과 같이 P_m 이 변화하면 등면적법의 조건도 변화하게 된다. P_m 이 감소하면 A_{acc} 도 감소하게 되어 계통은 더욱 안정하게 될 것이다. 하지만 부하가 증가하여 그림1에서와 같이 P_m 이 증가하게 되면 A_{acc} 은 증가하게 되고 A_{dec} 은 감소하게 되어 계통의 안정 마진은 줄어들 것이다. 따라서 안정해지기 위한 $A_{acc} < A_{dec}$ 의 조건을 만족하기 위해서는 사고제거를 더욱 빨리 해주어야 한다는 것이다. 즉 CCT가 P_m 의 증가에 의해 그만큼 줄어들든다는 것이다.

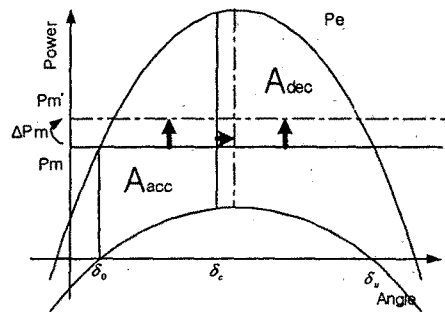


그림 1 P_m 의 증가와 안정마진 감소

2.2 $\frac{dt_{cc}}{dP_m}$ 의 수식화

과도안정도에서 계통은 외란이 발생하였을 때 일반적으로 사고 전, 사고 중, 사고 후의 3단계로 나누어지는데 그림2와 같이 각기 틀린 P_{\max} 을 가진다. δ_0 는 사고전 상차각을 나타내는 값이고 δ_c 는 사고제거 시점의 상차각으로 사고제거시간에 의해 결정되고 δ_a 는 사고제거후의 새로운 운전점을 나타낸다.

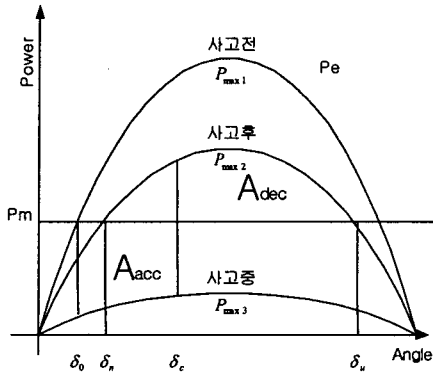


그림 2 단계별 P_e 의 변화

$$\delta_0 = \sin^{-1}\left(\frac{P_m}{P_{max1}}\right) \quad (2)$$

$$\delta_u = \sin^{-1}\left(\frac{P_m}{P_{max3}}\right) \quad (3)$$

δ_{cc} 는 임계 사고 제거시간으로 계통이 사고로부터 다시 안정할 수 있는 최대 상차각, 즉 $A_{acc} = A_{dec}$ 이 되는 시점에서의 δ 를 나타내는데 식(4)와 같이 정식화 할 수 있다[1].

$$\delta_{cc} = \cos^{-1}\left[\frac{P_m(\delta_u - \delta_0) - P_{max3}\cos\delta_n - P_{max2}\cos\delta_0}{P_{max3} - P_{max2}}\right] \quad (4)$$

t_{cc} 는 전력 상차각 δ 가 외란 발생후 δ_{cc} 까지 도착하는데 걸린 시간을 나타낸다[2].

$$t_{cc} = \int_{\delta_0}^{\delta_{cc}} f(\delta, \delta_0) d\delta \quad (5)$$

$$f(\delta, \delta_0) = \left[\frac{2}{M}(P_m(\delta - \delta_0) + P_{max2}(\cos\delta - \cos\delta_0))\right]^{-1/2} \quad (6)$$

하지만 식(6)은 $\lim_{\delta \rightarrow \delta_0} f(\delta, \delta_0)$ 일 경우 ∞ 가 되어 식(5)는 적당한 함수가 될 수 없고 위의 식들을 살펴보면 t_{cc} 는 P_m 의 까다로운 함수라는 것을 알 수 있다.

$$t_{cc} = F(\delta_0(P_m), \delta_{cc}(P_m), P_m) \quad (7)$$

아래에서는 식(7)를 선형화하기 위해 아래와 같이 나타내었다[2].

$$t_{cc} = t_{cc0} + \left.\frac{dt_{cc}}{dP_m}\right|_{P_m=P_{m0}} (P_m - P_{m0}) \quad (8)$$

위식에서 P_{m0} 는 계통의 동작점이 되고 t_{cc} 는 이 동작에서의 임계 사고 제거시간이 되고 여기에서 중요한 것은 $\frac{dt_{cc}}{dP_m}$ 의 계산이 될 것이다. 식(7)에 도함수의 연쇄법칙을 적용하면 우리는 아래와 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{dt_{cc}}{dP_m} = \frac{\partial F}{\partial \delta_{cc}} \frac{d\delta_{cc}}{dP_m} + \frac{\partial F}{\partial \delta_0} \frac{d\delta_0}{dP_m} + \frac{\partial F}{\partial P_m} \quad (9)$$

위에서 보는 것과 같이 식(9)은 다섯 개의 항으로 구성된 도함수이고 각 항들은 아래에 나와 있는 것과 같다.

$$\frac{d\delta_0}{dP_m} = \frac{1}{P_{max1}\cos\delta_0} \quad (10)$$

$$\frac{d\delta_{cc}}{dP_m} = -\frac{1}{(P_{max3} - P_{max2})\sin\delta_{cc}} (\delta_u - \delta_0 + \frac{P_{max2}}{P_{max1}}\tan\delta_0 + \tan\delta_n - \frac{P_m}{P_{max1}\cos\delta_0} - \frac{P_m}{P_{max3}\cos\delta_n}) \quad (11)$$

$$\frac{\partial F}{\partial P_m} =$$

$$\int_{\delta_0}^{\delta_{cc}} \frac{1}{M} \frac{-(\delta - \delta_0)d\delta}{\sqrt{\left[\frac{2}{M}(P_m(\delta - \delta_0) + P_{max2}(\cos\delta - \cos\delta_0))\right]^2}} \quad (12)$$

$$\frac{\partial F}{\partial \delta_{cc}} = f(\delta_{cc}, \delta_0) \quad (13)$$

$$\frac{\partial F}{\partial \delta_0} =$$

$$-f(\delta_{cc}, \delta_0) + \int_{\delta_0}^{\delta_{cc}} \frac{P_{max2}}{M} (\sin\delta - \sin\delta_0) f^3(\delta, \delta_0) d\delta \quad (14)$$

위에 나타난 식(10)~(14)을 식(9)에 대입하면 우리는 P_m 의 변화에 대한 t_{cc} 의 변화분을 나타내는 아래의 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{dt_{cc}}{dP_m} = -f(\delta_{cc}, \delta_0) \left[\frac{1}{P_{max}\cos\delta_0} + \frac{1}{(P_{max3} - P_{max2})\sin\delta_{cc}} \left\{ \delta_u - \delta_0 + \frac{P_{max2}}{P_{max1}}\tan\delta_0 + \tan\delta_3 - \frac{P_m}{P_{max1}\cos\delta_0} - \frac{P_m}{P_{max3}\cos\delta_3} \right\} + \int_{\delta_0}^{\delta_{cc}} \left[\frac{P_{max2}(\sin\delta - \sin\delta_0)}{MP_{max1}\cos\delta_0} - \frac{\delta - \delta_0}{M} \right] f^3(\delta, \delta_0) d\delta \right] \quad (15)$$

3. 사례 연구

본 논문에서는 앞에서의 수식을 토대로 EEAC를 사용하고 있는 TSAT(Transient Stability Assessment Tool) 프로그램과 지속적인 부하 성장과 전력산업의 구조개편을 시행하고 있는 우리의 입장을 반영하고 실제적인 전력계통의 안정적인 운용을 위하여 대상계통을 한전의 계획 계통인 2003년 하계 계통데이터를 중심으로 해석하였다. CT는 일반적으로 345KV선로에 적용되는 0.1초를 기준으로 하였고 시간 스텝은 0.0083초(0.5cycle) 시간간격을 사용하였다. 또한 사례 연구 대상이 되는 중요선로를 선정하기 위해서 SIME를 이용한 과도 안정도 스크리닝[3] 방법을 사용하여 태안, 당진 화력의 인근 선로인 신서산 아산 선로를 선정하여 모의하였다.

EEAC Power-Angle curve

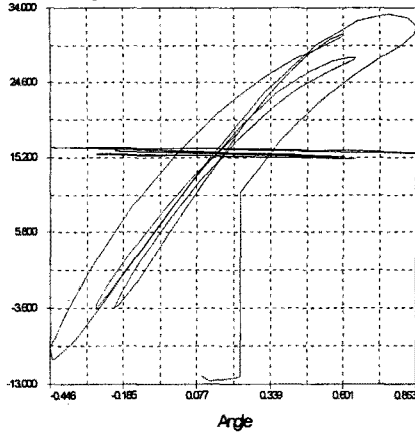


그림 3 2회선 사고시 EEAC

본 논문에서 과도 안정도 지수로 사용한 CCT는 같은 지역이라도 사고의 종류에 따라서 서로 다른 값을 가진다. 여기서는 제일 심각한 2회선 선로사고를 대상으로한 CCT를 기준으로 하였다. 그림3은 중부하시 신서산-아산 선로 간에 2회선 지락 사고가 발생하여 0.1초뒤 사고가 제거되었을 때 EEAC방법에 의한 전력-상차각 곡선을 나타낸 것이다. dt_{cc}/dP_m 에서 어느 지역에서나 P_m 이 변화한다고 해서 CCT가 변화하는 것은 아니다. 각각의 선로마다 중요한 영향을 미치는 발전단이 있다. 아래에 나타난 표1은 신서산-아산 사이에 사고가 발생하였을 경우 영향을 받는 발전기들이다.

표 1. 신서산-아산 선로에 영향을 미치는 발전기

Critical Cluster of Generators	
No.	Name
26201, 26202	당진1G, 당진2G
26203, 26204	당진3G, 당진4G
26101, 26102	태안1G, 태안2G
26103, 26104	태안3G, 태안4G
26105, 26106	태안5G, 태안6G

2절에서 dt_{cc}/dP_m 을 선형화 하였지만 실제로 이 함수는 비선형 함수이기 때문에 발전력이 많이 변화할 경우에는 오차가 많이 생길수가 있다. 그러므로 CCT가 0.1초 보다 매우 큰 경우에는 신뢰할 수 있는 값을 계산하기 힘들다. 다음에 나타난 표2는 중부하시와 경부하시에 신서산-아산 선로에 2회선 사고가 일어났을 경우의 CCT와 중요 연계발전단의 파라미터들이다. 각각의 파라미터들은 해당 발전단의 출력이 1MW증가시 감소하는 CCT를 나타낸다. 표2에서 나타낸 바와 같이 중부하시의 파라미터 값이 경부하시보다 적다. 그것은 중부하시에서의 발전기 출력 변화량이 경부하시 때보다 CCT에 미치는 영향이 적다는 것을 알 수 있다. 또한 이것은 출력량이 커질수록 파라미터 값들이 작아진다는 것을 의미하기 때문에 중부하시의 파라미터를 이용하더라도 실제 CCT보다는 어느 정도 여유분을 가지게 된다는 것이다.

표 2. 여유분을 결정하는 파라미터

	중부하시	경부하시
CCT	0.1362[sec]	0.1979[sec]
태안 발전단 지역의 $\frac{dt_{cc}}{dP_m}$	-0.000098[sec]	-0.00015[sec]
당진 발전단 지역의 $\frac{dt_{cc}}{dP_m}$	-0.000062[sec]	-0.00007[sec]

식(17)은 선로 사고시 영향을 받는 발전단이 1곳일 경우 과도 안정도적으로 안정해 질 수 있는 발전 증가량을 계산하기 위한 식이다.

$$\Delta CCT \geq ax_1 \quad (16)$$

$$x_1 \leq \frac{\Delta CCT}{a} \quad (17)$$

단, $\Delta CCT = CCT - CT$

$a = \frac{dt_{cc}}{dP_m}$: 위험 발전단의 파라미터

$x_1 = \Delta P_m$: 위험 발전단의 출력 변화

CT: 선로 보호기기 동작 시간

(ex) 345KV: 6Cycle, 754KV: 5Cycle

영향을 받는 발전단이 신서산-아산 선로와 같이 두 곳 이라면 식(17)은 식(18)과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta CCT \geq ax_1 + bx_2 \quad (18)$$

식(18)에서 b 와 x_2 는 다른 발전단의 파라미터와 출력 변화량이 된다.

식(18)에 표2의 파라미터들을 적용하면 중부하시 2회선 사고의 CCT가 0.1362초이므로 ΔCCT 는 0.0362가 되고 a 는 -0.98×10^{-5} , b 는 0.62×10^{-5} 이 된다. 이 값으로 x_2 즉, 당진지역의 발전 변화량이 없을 때 태안지역에 증가시킬 수 있는 발전량은 367.34MW가 되고 태안지역의 발전 변화량이 없을 때의 당진지역의 최대 발전 증가 가능량은 580.65MW가 된다. 그림4는 표2의 파라미터들과 식(18)을 사용하여 신서산-아산간 2회선 사고시 선로 보호기기가 제시시간에 동작한다는 전제하에 과도 안정도 확보를 위한 각 지역 발전기별 증가 가능량을 나타낸 것이다.

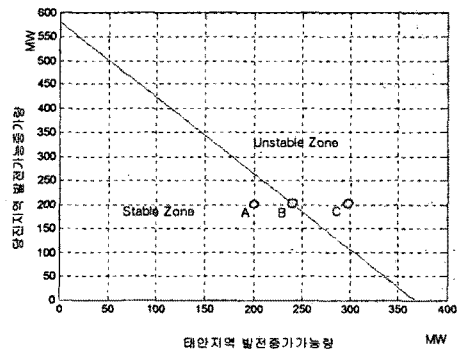


그림 4 안정 발전 증가 가능량

4. 결 론

계통 불안정은 계통구성과 운전조건에 따라 여러 가지 형태로 나타난다. 본 논문에서는 새로운 발전기 투입 또는 기존 발전기의 출력 변화에 의해 발전량이 증가 할 때 주위 중요 송전선로의 임계고장 제거시간(CCT) 변화 즉, dt_{cc}/dP_m 의 예를 보여주고 일반적인 사고제거시간(CT) 범위 안에서 안전하게 증가 시킬 수 있는 발전량을 결정하는 방법을 보여 주었다. 앞으로는 더욱 많은 사례연구를 통해서 이 방법의 신뢰성을 검증하고 또한 최근 안정도 연구에서 중요하게 부각되고 있는 실시간 적용방법에 대해서 더욱 논의가 되어야 할 것이다.

(참 고 문 헌)

- [1] A. R. Bergen and V. Vittal, "Power System Analysis", Prentice Hall, 1992
- [2] Yiqiao Liang, Saffet Ayasun, Chika Nwankpa, "Calculation of the Probability Density Function of Critical Clearing Time", Proceeding of the 35th Hawaii International Conference on System Science 2002
- [3] 이종석, 양정대, 이병준, 권세혁, 남해곤, 추진부, 윤상현, 박병철, "온라인 과도안정도 판정을 위한 고속 스크리닝 알고리즘 개발", 대한전기학회, 2001년 5월호
- [4] M. Pavella, P. G. Murthy, "Transient Stability of Power Systems: Theory and Practice", John Wiley & Sons, 1994
- [5] P. Kundur, "Power System Stability and Control", McGraw-Hill, 1994

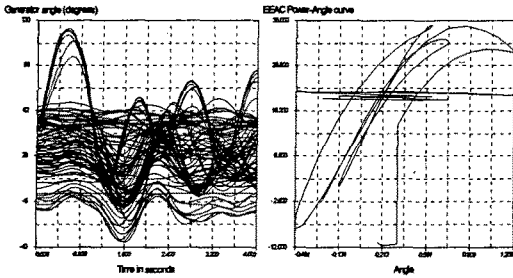


그림 5 A지역에서의 사고시 발전기 위상각과 EEAC에 의한 전력 상차각 곡선

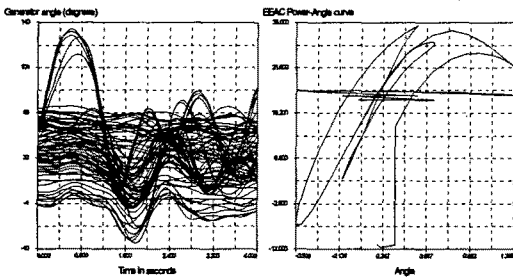


그림 6 B지역에서의 사고시 발전기 위상각과 EEAC에 의한 전력 상차각 곡선

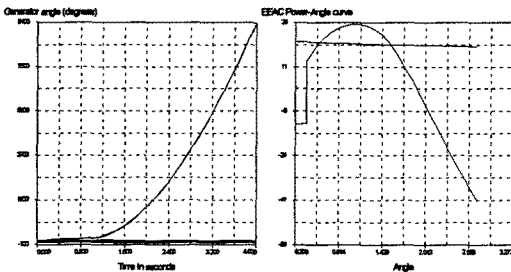


그림 7 C지역에서의 사고시 발전기 위상각과 EEAC에 의한 전력 상차각 곡선

그림5-7은 식(18)에 의해 그려진 그림4를 이용하여 계통의 발전량을 그림에 나타난 것처럼 각각 A,B,C로 변화시키고 이 때 2회선 사고가 발생하여 $CT=6Cycle$ 에 사고가 제거 되었을 때의 발전기 위상각과 EEAC에 의한 전력 상차각 곡선을 나타낸다.

그림4에서 A와 B점은 발전증가 가능 지역에서 운전되고 있으므로 그림5와 그림6의 위상각 그림에 나타난 것처럼 2회선 선로사고가 일어나도 정상 운전상태로 복귀가 가능하다는 것을 알 수 있고 위상각 침투치가 B지역에서 운전할 때보다는 A지역에서 운전할 때 낮게 나타나는 것을 관찰할 수 있다. 또한 그림5,6의 전력상차각 곡선을 보면 그림6의 전력상차각 곡선이 조금 더 안정마진이 적다는 것을 알 수 있다.

그림4에서의 C점은 안전 발전 증가량을 초과하는 지역으로 사고시 그림 7과 같이 계통이 정상상태로 복귀하지 못하고 발전기군이 주계통으로부터 동기 탈조됨을 알 수 있다.