

송전선 절체제어에 의한 전력계통 안정화 연구

○서 의 석, *오 태 규, **한 후 석
○호남대학교 전기전자공학부, *전기연구소, **전북대학교

A Study on Transient Stability Augmentation
by Transferring Line and Bus

○Eui-Suk Suh, *Tae-Kyoo Oh, **Hoo-sek Han
○School of Electrical & Electronics Engineering, Honam University, *KERI, **Chonbuk.N.U

Abstract - This paper presents the scheme of bus and line transfer for improving transient stability and the relative transient stability index usable in time simulation. And also multi-transferring scheme for improving damping is proposed. These results can be applied in determining the effective position for transfer control.

1. 서 론

모선 및 루프연계선로 분리는 단락용량을 감소시키는 동시에 계통의 안정도를 저하시키는 요인이 되며, 이 경우 사고제거와 동시에 모선 또는 선로 절체에 의해 계통의 연계를 강화하면 계통의 안정도를 향상시킬 수 있다. 이와같이 절체제어는 단락용량과 과도안정도 문제로 요구되는 계통구조 변경 운용을 잘 양립시킬 수 있고, 전 원과 부하제한과는 달리 수급의 제한 없이 계통을 안정화시킬 수 있다. 아직 이들 기술이 계통에 실용화되고 있지는 않지만, 장애 동기개폐에 의해 계통구성을 순서로 절체하는 운용기술이 가능해질 경우 계통이 과도안정도 면에서 어느 정도 강화될까하는 점에 대하여 국외의 경우 기초적인 검토가 행해지고 있다^[1].

본 연구에서는 계통구성을 순서로 절체하는 운용이 가능한 것으로 가정하여 모선 및 선로절체 제어에 의한 계통안정화의 효과를 분석하며, 효과적인 절체위치와 방식을 검토하였다. 에너지함수법에 의하면 시스템분리에 기여하는 에너지는 주로 탈조발전기군의 에너지함수와 관련한다는 연구결과^[2,3]를 근거로 탈조발전기군과 주계통의 2기 등가계통의 에너지함수를 모델링하여 과도안정도 평가지표를 제안하였다. 이를 사용하여 효과적인 절체 위치를 선정하며, 에너지함수에 근거하여 댐핑을 향상시키기 위한 다단절체방식을 검토하였다. 이들 제안한 방법을 PSS/E 프로그램을 사용하여 대규모 모델계통에 적용검토하였다.

2. 에너지함수에 근거한 절체제어 방식

2.1 에너지함수와 평가지표

에너지함수법에 의하면 시스템분리에 기여하는 에너지는 시스템전체의 에너지 보다는 주로 탈조 또는 분리하고 있는 기기들의 과도에너지에 의존한다는 것이다. 따라서 주계통으로부터 탈조분리하려는 발전기군의 개별 에너지함수를 사용한다.

탈조발전기군을 a로, 주계통을 b로 나타내어 주계통 판정중심각(COI)에 대한 탈조발전기군 판정중심각의 운동방정식을 타내내면 다음과 같다.

$$M_a \ddot{\omega}_a = P_{coa} - \frac{M_a}{M_b} P_{cob} \quad (1)$$

$$\dot{\theta}_a = \dot{\omega}_a = \omega_a - \omega_b = \delta_a - \delta_b \quad (2)$$

여기서

$$M_a = \sum_{i \in a} M_i, \quad \delta_a = \frac{\sum_{i \in a} M_i \delta_i}{M_a}$$

$$P_{coa} = \sum_{i \in a} (P_{mi} - P_{ei}) = P_{ma} - P_{ea}$$

탈조발전기군 개별 에너지함수는 임의시간 t까지 에너지적분에 의해 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$V_a = \frac{1}{2} M_a \omega_a^2 - \int_{\theta_a}^{\theta_a'} (P_{coa} - \frac{M_a}{M_b} P_{cob}) d\theta_a \quad (3)$$

$$= V_{ak} + V_{ap}$$

여기서 θ_a' : 사고발생직전의 운전 평형점

θ_a : 사고발생 후 임의시점에서의 상차각

식 (3)는 발전기군 a의 과도 에너지로서 우변 첫번째 항은 주계통 발전기군에 대한 상대적인 운동과 관련한 운동에너지, 나머지 항은 계통이 흡수하는 위치에너지이다. 사고즉시기간동안 계통에 유입되는 과도에너지는 운동에너지 V_{ak} 를 증가시키며 위치에너지 V_{ap} 를 감소시킨다. 사고제거후 네트워크에 변화가 없다면 사고제거후 V_a 는 일정히 유지된다. 한편 사고제거후 발전기속도는 감소하여가며 운동에너지 V_{ak} 는 위치에너지 V_{ap} 로 변환되어 계통에 의해 흡수되어 간다. 계통의 흡수능력이 충분하여 운동에너지가 모두 위치에너지로 변환되면(동기속도회복, 최대동용각에 이룸) 발전기의 위상각은 감소하기 시작하며 계통은 과도안정해지고, 그렇지 못한 경우는 불안정한 경우이다. 즉, 불안정 평형점에서 계산된 위치에너지 V_{ap}^u 가 사고제거시점에서의 과도에너지 V_a^u 보다 크면 안정한 경우이다. 사고제거시점의 위치에너지를 제외한 이들 에너지를 각각 V_{ak}^c , V_{ap}^c 라 하면, 과도안정할 조건은 $V_{ap}^c > V_{ak}^c$ 로 나타낼 수 있으며, 그 차이가 안정도마진이 된다.

$$V_a^{margin} = V_{ap}^c - V_{ak}^c > 0 \quad (4)$$

식 (4)의 안정도마진을 구하기 위해서는 불안정평형점까지의 동요각계적을 알아야하며 에너지함수법에서는 이를 선형화하여 근사적으로 계산한다. 본 연구에서는 PSS/E시뮬레이션 결과를 이용하여 안정도 평가지표를 다음과 같이 정하였다.

과도안정한 경우 불안정평형점에 이르기전에 상차각은 감소하기 때문에 PSS/E 시뮬레이션에 의해서는 발전기 동요계적을 따라 불안정평형점까지의 위치에너지 V_{ap} 를 구할수 없게 된다. 따라서 식 (4)을 다음과 같이 변형하여 데이터를 얻을 수 있는 시점 t에서의 값을 사용하기로 한다.

$$RKP^t = \frac{V_{ap}^t}{V_{ak}^t} \Rightarrow \max \quad (5)$$

식(5)의 RKP(ratio of kinetic energy to potential energy) 지표는 사고동안 증가된 운동에너지 V'_{ak} 가 시간 t에서 얼마큼 위치에너지로 변환되었는가를 나타내며, RKP'가 클수록 동기속도의 복원력이 크다는 것을 나타낸다. 사고제거후 위치에너지는 사고제거시점의 운동에너지보다 커질수 없으므로 $V'_{op} \leq V'_{ak}$ 이고, $RKP' \leq 1$ 이며, 1에 가까울수록 안정한 경우이다.

2.2 과도안정도 향상을 위한 절체제어 방식

전력계통의 과도불안정은 사고로 발전기의 기계적입력과 전기적출력의 과도한 불평형에 의해 발생된다. 전기적출력의 변화는 네트워크의 변화에 의해 거의 순간적으로 발생하는 반면 기계적입력은 그렇게 빠르게 변화시킬수 없기 때문이다. 이 사실은 또 다른 네트워크의 변경에 의해 불평형을 빠르게 해소할 수 있다는 것을 나타낸다.

네트워크 변경에 의한 전력불평형 해소방법으로는 계통내의 발생 또는 소비에너지를 순간적으로 변화시키는 방법과 모선 또는 선로절체제어에 의한 전력조류를 순간적으로 변화시키는 방법^[4]을 들 수 있다.

계통내 모선분리기 예상되는 곳은 평상시 단락용량이 허용치를 초과하는 곳으로 많은 발전기들이 연결된 대단위 전원군의 모선 또는 많은 선로가 연결된 주요변전소이다. 이로 계통이 취약해져 사고발생시 과도안정도가 문제되는 경우 모선분리 또는 선로절체 연계를 생각할 수 있다. 이 경우 모선내 어느 곳에서, 어떠한 방법으로 절체제어할 것인가를 검토하게 된다.

고장제거 직후에 계통구성을 절체하는 것이 허용된다면 다음과 같은 계통구성의 절체를 행하는 것으로 과도안정도를 향상시킬 수 있다.

$$NS_{pre} \Rightarrow NS_{fault} \Rightarrow NS_{post} \Rightarrow NS_{pre} \quad (6)$$

NS_{pre} 와 NS_{fault} 는 고장발생전 및 고장중의 계통구성으로 단락용량이 허용치 이내이며, 계통에 주는 사고의 영향이 최소가 되도록 구성한다. NS_{post} 는 사고제거 직후의 계통구성으로 사고의 영향을 흡수하는 능력이 크도록 구성한다. 또한 first swing후 발전기들은 가속, 감속을 반복하여 가며, 댐핑을 줄이기 위해서는 가속시는 계통 네트워크의 에너지흡수 능력을 크게하고, 감속시는 작게하도록 절체제어를 행하면 스윙은 빠르게 감소하여 같거나 예상할 수 있다.

식(6)의 절체방안과 식(4)의 안정도마진의 측면에서 사고중 증가된 발전기의 운동에너지 보다 사고제거후 계통의 에너지흡수능력이 가능한 크게 되도록 절체제어하여 제 1파의 최대위상각차(초기치에서 first swing의 피크치 까지)를 억제하도록 한다. 즉, 과도안정도 향상을 위한 절체방식으로 사고제거 직후 전기적출력을 증가하는 방향으로 1회 절체제어하여 최소한 first swing 동안 유지하도록 한다.

이 경우 각 절체대상에 대해 앞에서 제시한 안정도평가 지표를 사용하여 가장 효과적인 위치를 선정하는 것으로 한다. 즉, 각 절체위치에 대한 RKP'를 계산하여 이 중 RKP'가 가장 큰 위치가 절체제어에 의해 가장 과도안정영역을 확대할 수 있게 된다.

2.3 댐핑향상을 위한 다단절체제어 방식

계통절체를 1회에 그치지 않고 고장제거후 복수회의 절체를 행하면 제 2파 이후에 대한 댐핑을 강하게 할 수 있으며, 이 경우 어떤 방법으로 절체제어하면 효과적일까를 검토한다.

사고제거후 운동에너지와 위치에너지 사이에 변환이 반

복되면서 발전기가 역시 중요하게된다. 이때 스윙의 폭을 감소시키는 방법으로 각속도의 자승으로 표현되는 운동에너지를 가능한 빠르게 감소하도록 제어하는 하는 것이다. 즉, 운동에너지의 시간변화율이 최소가 되도록 제어하면 스윙을 작게할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{V}_{ak} &= M_a \dot{\omega}_a \dot{\omega}_a \\ &= (\omega_a - \omega_b) \left(P_{ma} - P_{ea} - \frac{M_a}{M_b} P_{coa} \right) \Rightarrow \min \end{aligned} \quad (7)$$

식 (7)의 절체규칙은 발전기군 a가 주계통의 관성중심 각속도 보다도 빠르면 ($\omega_a > \omega_b$) 발전기군 a의 출력 P_{ea} 가 크게되도록, 또 역으로 ($\omega_a < \omega_b$)일 때는 P_{ea} 가 작게 되도록 제어하여 가만 좋다는 것을 알 수 있다. 이때 절체에 의해 계통의 연계가 강화되는 방향이면 P_{ea} 는 증가하고, 연계가 약화되는 방향이면 감소하게 된다.

3. 절체제어 시뮬레이션

3.1 모델계통, 사고 및 절체조건

모델계통을 탈조발전기를 중심으로 그림 1에 나타내었으며, 규모는 부하수준 37GW, 770모선, 210기의 발전기로 구성되어있다. B, C모선은 동일 발전소에 위치하고 단락용량 초과문제로 평상시 분리운전하며, 6기의 발전기를 B, C 모선에 어떻게 연결하는가에 따라 모선 및 선로 절체위치를 구분한다.

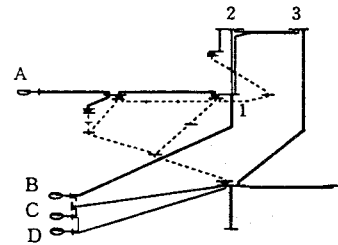


그림 1 모델계통

표 1 운전, 사고 및 절체조건

O	운전조건	모선 단락전류
0	B,C 모선 연계(6기)	B:C:54kA D:54kA
1	B(2기), C(4기) 분리	B:16kA D:40kA
2	B(3기), C(3기) 분리	B:19kA D:38kA
3	B(4기), C(2기) 분리	B:22kA D:35kA
F	사고조건	안정도
1	모선1에서 0.1초 단락사고후 선로 1-2, 1-3 차단	A,B발전기 탈조
2	모선B에서 0.1초 단락사고후 선로 B-1 1회선 차단	과도안정
C	절체조건	
0	절체제어 하지 않을 경우	
1	사고제거와 동시 B, C 모선 연계	
2	사고제거와 동시 C연결선로 B로 절체	
3	B, C 모선 연결, 분리 다단절체	
4	B, C 모선 연결선로 다단절체	

3.2 모선 및 선로절체 시뮬레이션 결과

탈조발전기군 B의 개별에너지함수 모델에 대해 각 운전, 사고 및 절체조건을 적용하여 주계통에 대한 발전기군 B의 P-θ곡선, 상차각곡선, 에너지함수 값 변화 및 안정도지표 RKP를 검토 요약하여 표 2에 나타내었다.

그 결과는 단락용량 문제로 B와 C모선을 분리운전시 과도안정도는 절체제어 않는 경우 B모선에 발전기수를 적게 연결하는 운전조건 1이 유리하다. 반면에 사고제거와 동시에 모선에 또는 선로절체 제어를 하는 경우는 C모선의 발전기수가 적게되는 운전조건 3이 운전조건 1보다 유리한 것으로 나타난다.

RKP^{0.175}의 값과 first swing의 최대상차각 $\Delta\theta^{max}$ 와의 관계를 나타내면 그림 7와 같이 거의 반비례한다. 이는 과도안정도와 안정도지표 RKP의 크기가 정확히 일치하고 있음을 나타내며, 따라서 효과적인 절체제어 위치는 RKP의 값이 가장 큰 운전조건으로 선정하는 것으로 하였다. 효과는 모선절체의 경우 3~17(p.u.) 정도, 선로절체의 경우는 3~12(p.u.) 정도의 에너지흡수 효과가 있다.

그리고 1회 선로절체제어시 효과가 가장 큰 운전조건 3의 경우에 있어 2회 이상의 선로절체제어할 경우 댐핑의 향상효과를 검토하였다.

선로절체에 의한 출력의 변화는 탈조발전기군과 주계통 사이에 연계가 취약할수록 크며, 절체영향이 너무 큰 경우는 다단절체에 의해 오히려 안정도가 나쁘게 된다.

사고조건 1은 매우 가혹한 사고로 사고제거시 주계통과 연계가 매우 취약하여 전기적출력이 기계적입력 보다 매우 낮아 과도불안정한 경우로, 사고제거와 동시에 선로절체제어 하여 전기적출력을 증가시키면 과도안정해진다. 그 이후 댐핑 향상을 위해 각속도가 영이 되는 시점에서 다단절체제어하면 그 영향이 너무 커서 크게 스윙하며, 최종의 계통구성 상태가 취약상태이면 결과적으로 발전기가 탈조하게 된다. 따라서 사고조건 1의 경우는 사고제거와 동시에 탈조발전기군과 주계통사이의 연계를 강화하는 방향으로 1회 절체하여 전기적출력을 회복하도록 하는 방식이 가장 효과적이다.

사고조건 2는 대상발전기군이 주계통에 어느 정도 강하게 연계되어 있어 각속도가 영이 되는 시점에서 다단절체 제어시 그림 8과 같이 전기적출력의 수준이 기계적입력에 가깝게 되어 그림 9와 같이 가속, 감속을 효과적으로 억제, 발전기가 동요를 억제할 수 있다.

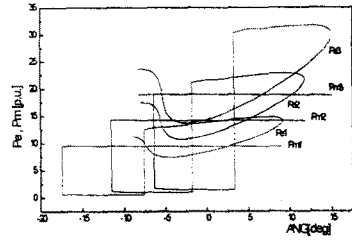


그림 2 사고조건1의 모선연계시 P-θ 곡선

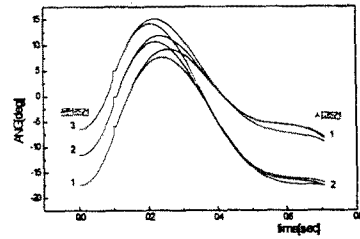


그림 3 모선연계시 상차각 곡선

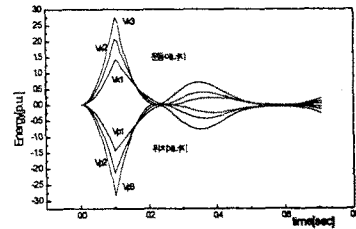


그림 4 사고조건1의 모선연계시 에너지변화

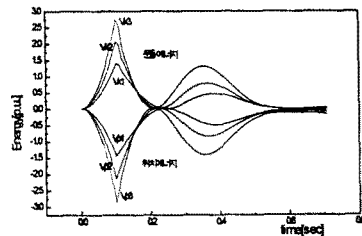


그림 5 사고조건 2의 모선연계시 에너지변화

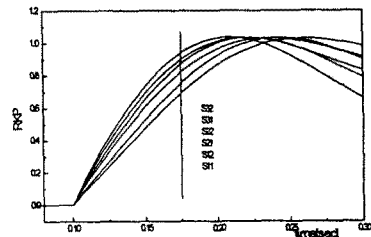


그림 6 모선연계시 RKP 변화

표 2 1과 억제를 위한 모선, 선로 절체제어시 결과

COF	안정도	$\Delta\theta^{max}$ [deg]	RKP ^{0.175} 지표	사고제거 시점 Pe (Pm)(p.u.)	절체에 의한 출력증가폭 [p.u.]
012	안정	37.4	0.355	10.06 (9.43)	
022		42.9	0.240	14.12 (14.15)	
032		50.6	0.137	17.85 (18.87)	
011	불안정	82.8	-0.200	7.22 (9.43)	
021		발산	-0.313	10.22 (14.15)	
031		발산	-0.409	13.05 (18.87)	
132	안정	20.6	0.942	31.32	13.47
131		21.5	0.901	30.29	17.24
122		22.2	0.874	21.87	7.75
121		23.4	0.824	21.09	10.87
112		25.1	0.756	13.12	3.06
111		26.7	0.694	12.58	5.36
232	안정	23.7	0.809	27.13	9.28
222		24.1	0.793	20.09	5.97
212		24.9	0.764	13.14	3.08
231		26.4	0.702	25.18	12.13
221		26.9	0.681	18.57	8.35
211		28.0	0.645	12.07	4.85

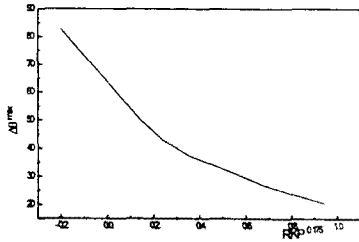


그림 7 RKP와 최대상차각과의 관계

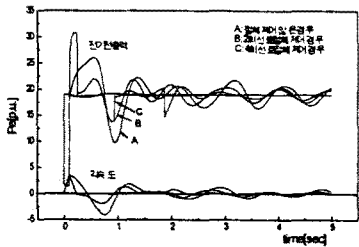


그림 8 COF=432시 전력-상차각 곡선

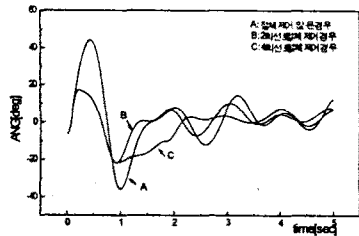


그림 9 COF=432시 상차각 곡선

4. 결 론

본 연구에서는 계통안정화를 위한 모선 및 선로의 효과적 절제 제어 방식 및 위치 선정, 과도안정도지표를 제안하여 대규모 계통에 적용 검토하였다. 그 결론은 다음과 같다.

과도안정도 지표 RKP는 상차각변화, P-θ 곡선, 에너지 흡수 변화 및 first swing의 최대상차각의 검토결과 상대적인 과도안정도를 정확히 평가할 수 있었으며, 이를 효과적인 절제위치 선정에 사용할 수 있음을 나타내었다.

사고제거 직후 1회 절제방식의 경우 모선절제의 효과는 3~17(p.u.)(0.6~3.5기의 발전기트립), 선로절제 제어 효과는 3~12(p.u.)(0.6~2.5기의 발전기트립)의 에너지 흡수능력을 나타내었으며, 절제제어를 하지 않는 경우와는 반대로 탈조발전기측 보다는 주계통측에 발전기가 적게 연결된 모선구성이 절제에 의한 안정도향상 효과가 크게 나타났다.

다단절제 제어시(2회 이상 절제제어) 효과는 취약계통의 경우는 오히려 역효과를 나타낸다. 이 경우는 탈조발전기군이 주계통에 강하게 연계되는 방향으로 1회 절제 제어하는 방식이 과도안정도를 향상시킬 수 있다. 사고 제거 후 전기적출력의 회복이 기계적입력 수준과 유사한

경우는 각속도가 영이되는 시점에서 다단절제 제어하여 전기적출력, 각속도, 운동에너지의 스윙을 감소시킬 수 있으며, 따라서 발전기각 동요를 억제할 수 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] 本浩 외, "송전선의 긴급절제 제어에 의한 전력계통의 안정화에 관한 기초적고찰", 일본전기학회 논문집B, 112권 11호, 1992)
- [2] A.N. Michel, "Power System Transient Stability Using Individual Machine Energy Functions" (IEEE-CAS, Vol. 30, No. 5, 1983)
- [3] T. Athay, "A Practical Method for the Direct Analysis of Transient Stability" (IEEE-PAS, Vol. 98, No. 2, 1979)
- [4] Edward W. Kimbark, "Improvement of Power System Stability by Changes in the Network" (IEEE Trans. Power App. Sys., May 1969)

"본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초전력공학공동 연구소 주관으로 수행되었음"