

PSS Tuning시 위상보상이 계통안정도에 미치는 영향 분석

김태근^o 신정훈
한국전력공사 전력연구원

**An Analysis on Effects of Phase Compensation on Power System Stability
in the PSS Parameter Tuning**

Tae Kyun Kim^o Jeong Hoon Shin
Korea Electric Power Research Institute(KEPRI)

Abstract - This paper presents the result of an analysis on effects of phase compensation on power system stability in the PSS parameter tuning. Synchronizing and damping coefficients are induced from linear model for generator with PSS. Synchronizing and damping coefficients corresponding to time constants of phase compensation control block are calculated on a single machine, infinite bus test system. The parameter tuning concepts, basic function, structural elements and performance criteria of PSS are introduced.

1. 서 론

현대 전력계통은 환경에 대한 사회적 관심 고조로 발전소 및 송전선 설비 입지 선정의 어려움이 계통계획 수립시 매우 중요한 제약조건으로 되고 있다. 따라서, 계통 계획시 발전기의 단위 용량과 선로의 전력 수송량을 증가하도록 하고, 이에 따른 안정도 여유의 저하 문제는 계통운용시 적절한 제어를 통하여 보상하는 것이 경제성과 안정성을 동시에 추구할 수 있는 한 방법이 될 수 있다.

발전기의 단자전압과 무효전력 제어를 위하여 사용된 초기의 수동전압조정장치는 계통의 과도안정도를 향상시키기 위하여 이득상수를 높은 속응형 자동전압조정장치로 그 기능이 확대 보장되어 왔다. 그리고, 1960년대에 P.Demello와 C.Concordia에 의해 속응형 자동전압조정장치가 음의 댐핑토크에 의한 저주파 동요를 발생시킨다는 사실이 입증된 이후, 저주파 동요를 억제하도록 하기 위한 유효한 수단으로써 안정화 신호를 여자의 보조입력으로 사용하는 방법이 일반적으로 사용되고 있다(1).

전력계통에서 발생하는 장주기 저주파 동요 현상은 장시간 지속되는 경향이 있으며, 이로 인하여 전력전송 능력이 제한되기도 하는데, 전력계통안정화장치(PSS: Power System Stabilizer)는 발전기 여자시스템 제어를 통해 계통의 진동을 억제하기 위한 댐핑을 강화함으로써 전력전송 측면에서 안정도 한계를 확장하기 위하여 사용된다.

캐나다는 1960년대에 Northern Ontario에 있는 Moose River의 수력발전기 4대에 처음으로 PSS를 적용한 이후, 화력발전기에도 성공적으로 적용하여 계통전체의 안정도를 향상시키므로써 전력계통 계획 및 운용에 상당한 유연성을 제공한 바 있고, 미국은 1960년대 Western System에 PSS를 적용한 것을 필두로 현재 광범위 하게 적용하고 있으며(2,3), 일본은 1980년대 초부터 PSS를 적용하였고, 현재는 속응형 여자를 사용하는 경우 PSS를 부가하는 것을 표준으로 하고 있다.

우리나라는 1980년 이후에 건설된 삼랑진양수와 보령화력발전기등 일부 발전기에 아날로그형 PSS를 적용하고 있으며, 1990년 대에는 영광원자력 발전기를 필두로 디지털형 PSS를 적용하는 추세이다.

PSS는 각 발전기 특성과 계통상황을 고려하여 적용되어야 하는데, 정밀한 계동신호를 주지 못하면 적용 효

과가 미흡하거나, 오히려 계통의 진동을 확대시킬 수 있으므로 발전기나 계통상태 변화에 따른 PSS 파라미터 Tuning은 매우 중요한 문제로 된다.

PSS에서 Tuning 해야 할 주요 파라미터는 이득상수와 위상보상 시정수 인 데, 이중 본 논문에서는 위상보상에 따른 동기화토크와 댐핑토크의 변화를 검토하여 PSS가 동작해야 할 동요 주파수 대역 전체에서 바람직한 제동특성을 제공할 수 있는 위상보상 특성을 결정하고자 한다.

**2. 전력계통 진동모드와 PSS 파라미터 Tuning
2.1 전력계통 진동모드**

발전기가 장거리 송전선로를 통하여 대전력을 수송하는 경우와 같이 계통이 비교적 취약하게 운전되고 있는 상태에서는 고장이 발생한다던지 혹은 미소한 부하의 변화가 있는 경우에도 저주파 진동이 발생할 수 있고, 이러한 진동은 전력전송량을 제한할 수 있다.

대규모 전력계통은 계통 규모에 따라 수십에서 수천개의 진동모드를 갖고 있는데, 이 중 계통안정도 해석 및 제어 측면에서 특별히 관심을 갖는 진동모드로는 inter-area 진동 모드, local 진동 모드, intra-plant 진동 모드등이 있다.

미국의 경우 PSS를 광범위하게 사용한 것은 1960년대에 West Coast Utilities이다. 이들은 진동 불안정 때문에 Pacific Northwest와 Southwest를 연결하는 500kV 송전선을 통하여 전력을 충분히 공급할 수 없다는 것을 발견하였는 데, 이러한 형태가 inter-area 진동 모드에 해당하며, inter-area 진동모드의 전형적인 진동 주파수는 0.2~0.5Hz에 존재한다.

다음 발전기가 비교적 큰 계통과 장거리 송전선으로 연결되어 전력을 공급하는 경우에 발생하는 진동을 local 진동 모드라고 하며, local 진동 모드의 전형적인 진동 주파수는 0.8~2.0Hz에 존재한다.

끝으로 같은 발전소 내에서 각 발전기들 간에 진동이 발생하는 경우가 있는데, 이를 intra-plant 진동 모드라고 한다. intra-plant 진동 모드의 전형적인 진동 주파수는 1.5~2.5Hz에 존재하며, 이는 전력전송 안정도에 관련되는 저주파 동요라기 보다는 각 발전기의 제어 동작에 의한 상호작용에 의하여 발생하는 것이다.

2.2 PSS 파라미터 Tuning

전력계통에서 나타나는 여러 가지 진동모드를 안정화 시키기 위한 보조여자제어 튜닝은 1960년 대부터 매우 중요한 연구과제로 되고 있다. PSS는 0.1~3.0Hz의 동요 주파수 대역에서 바람직한 댐핑특성을 제공할 수 있도록 Tuning 되어야 하며, 동시에 계통전체로 보아 유해한 상호작용이 발생하지 않도록 해야 한다.

PSS에서 Tuning 해야 할 파라미터는 크게 이득상수, washout 시정수, 위상보상 시정수, 출력제한으로 되며, 이 중 특히, 중요한 것은 이득상수와 위상보상특성이다.

PSS의 이득상수는 최대의 댐핑을 발생시킬 수 있도록 결정되어야 하지만, 실체는 control mode의 안정도, 과도안정도, 그리고, PSS 입력신호의 noise 확대

등의 이유로 제한되고 있다.

washout은 일종의 high pass 필터로서, washout의 시정수는 관심있는 주파수대역에서 안정화신호가 손상되지 않고 비교적 원래대로 통과할 수 있을 만큼의 시간이면 되는 것으로, 일반적으로 1~20초 내에서 결정한다. 기존 논문에 의하면 local 진동모드에 대해서는 1~2초가 적당하고, inter-area 진동모드에 대해서는 10초 이상이 적당한 것으로 알려져 있다.

PSS가 댐핑을 제공하기 위해서는 속도변화와 동상인 전기적토크 성분을 발생시켜야 하며, 따라서, 여자기 입력과 전기적토크 사이의 발전기, 여자시스템, 전력계통을 통해 나타나는 위상지연을 보상할 수 있도록 적절한 위상선행 특성을 갖고 있어야 한다. 위상보상이란 결국 위상보상을 표현하는 제어블럭의 시정수를 결정하는 것으로, 시정수에 따른 주파수-보상각도 곡선을 구하고, 이 곡선으로부터 적정 시정수를 결정하게 된다. PSS가 동작해야 할 동요주파수(약 0.1~3Hz) 대역 전체에서 최대의 댐핑을 발생시킬 수는 없으므로, 댐핑토크와 동기화토크 성분 모두를 증가시킬 수 있다는 관점에서 과다보상보다는 다소의 부족보상이 바람직하다.

과도시 발전기 단자전압의 변동을 만족할 만한 수준으로 억제하고, PSS가 실패했을 경우에 발생할 수 있는 발전기 트립의 가능성을 최소화 하기 위하여 PSS의 출력을 제한하게 된다. Ontario Hydro의 경우에는 PSS의 역할을 최대한 발휘할 수 있도록 상한은 0.1~0.2p.u. 정도로 비교적 크게 하여 사용하고 있으며, 하한은 -0.05~-0.1p.u. 정도로 사용하고 있다.

2.3 성능기준 및 평가

PSS가 댐핑을 부족하게 보상하면 계통의 저주파동요가 덜 감쇠되고, 너무 과도하게 보상하면 여자시스템의 전압조정능력을 너무 많이 빼앗게 되어, 대규모 계통의 과도안정도를 저해할 수 있으므로 PSS의 역할은 신중히 결정되어야 한다.

이미 발표된 문헌들에 의하면 위상보상특성의 성능기준으로서 다음의 조건을 만족할 것을 주장하고 있다.

첫째, PSS가 동작해야 할 약 0.1~3.0Hz의 동요주파수 대역 전체에서 위상보상 후의 위상지연이 90° 이내로 될 것.

둘째, local 진동모드의 진동주파수 대역인 약 0.8~2.0Hz 에서는 위상보상 후의 위상지연이 45° 이내일 것.

PSS의 성능은 댐핑을 얼마나 강화하는가에 의하여 평가되어야 하며, local 진동모드에 대하여 충분한 댐핑을 제공하고, 동시에 inter-area 진동모드에도 높은 기여를 하도록 하는 것이 바람직하다.

이러한 성능을 평가하기 위한 계통해석 수단으로는 크게 미소신호안정도 해석과 과도안정도 해석으로 나눌 수 있다. 미소신호안정도 해석을 위한 Tool로는 EPRI가 개발한 PSAPAC(Power System Analysis Package)의 PEALS가 대규모 계통에서 inter-area 진동모드의 영향을 평가하기 위하여 사용될 수 있고, MASS가 local 진동모드의 영향을 평가하기 위하여 사용될 수 있다. 과도안정도 해석은 PSS의 여러 파라미터에 대한 고유치 해석의 결과를 검증하기 위하여 실시하는 것으로, 특히, 출력제한의 적정성을 평가하는 데 유리하다.

3. PSS가 제공하는 동기화토크 및 댐핑토크

여자기 입력으로부터 전기적토크(ΔT_e) 사이의 발전기 전달함수가 순수한 이득상수로 되어 있다면 $\Delta \omega_r$ 에 의한 귀환은 전적으로 댐핑성분만을 제공할 것이다.

그러나, 실제로는 여자시스템, 발전기 제자회로, 전력계통에 의하여 위상지연이 발생하고, 이것은 주파수에 종속적으로 된다. 따라서, PSS의 전달함수인 $G_{PSS}(s)$ 는 여자기입력과 전기적토크 사이의 위상지연을 보상할 수

있도록 적절한 위상보상 회로를 갖고 있어야 한다.

PSS의 위상보상이 여자기입력과 전기적토크 사이의 위상지연을 정확히 보상한다면 PSS는 순수히 댐핑성분만을 제공할 것이고, 이것은 어느 한 동요주파수에서는 가능할 것이다. 그러나, 위상지연이 주파수에 종속적으로 발생하고, PSS가 담당해야 할 동요주파수 대역은 약 0.1~3.0Hz가 되므로, PSS는 동기화토크 성분과 댐핑토크 성분을 동시에 제공하게 된다.

여기서는 PSS가 제공하는 동기화토크와 댐핑토크를 이론적으로 검토하기 위하여 PSS에 의한 전기적토크의 변화를 나타내는 식을 유도하기로 한다.

먼저, PSS가 포함된 발전기 선형모델을 그림 1에 나타내었다. 그림 1에서 여자는 이득상수가 $G_{ex}(s) = K_A$ 인 싸이리스터 여자기이고, PSS의 입력으로는 회전자의 속도편차($\Delta \omega_r$)를 사용하였다.

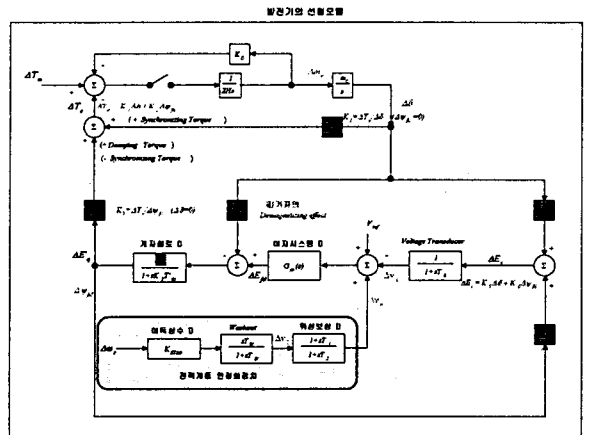


그림 1 PSS를 포함한 발전기의 선형모델

그림 1로부터 발전기의 상태공간 모델은 식 (1)과 같이 된다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta \omega_r \\ \Delta \delta \\ \Delta \Psi_{fd} \\ \Delta v_1 \\ \Delta v_2 \\ \Delta v_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{32} & a_{33} & a_{34} & 0 & a_{36} \\ 0 & a_{42} & a_{43} & a_{44} & 0 & 0 \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & 0 & a_{55} & 0 \\ a_{61} & a_{62} & a_{63} & 0 & a_{65} & a_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \omega_r \\ \Delta \delta \\ \Delta \Psi_{fd} \\ \Delta v_1 \\ \Delta v_2 \\ \Delta v_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서,

$$a_{11} = -\frac{K_D}{2H} \quad a_{12} = -\frac{K_1}{2H} \quad a_{13} = -\frac{K_2}{2H}$$

$$a_{21} = a_{10} \quad a_{32} = -\frac{\omega_0 R_{fd}}{L_{fd}} m_1 L_{ads}$$

$$a_{33} = -\frac{\omega_0 R_{fd}}{L_{fd}} \left[1 - \frac{L_{ads}}{L_{fd}} + m_2 L_{ads} \right]$$

$$a_{34} = -b_{32} K_A = -\frac{\omega_0 R_{fd}}{L_{adu}} K_{2,36} = -a_{34}$$

$$a_{42} = \frac{K_5}{T_R}, \quad a_{43} = \frac{K_6}{T_R}, \quad a_{44} = \frac{1}{T_R}$$

$$a_{51} = K_{STAB} a_{11} \quad a_{52} = K_{STAB} a_{12} \quad a_{53} = K_{STAB} a_{13}$$

$$a_{55} = -\frac{1}{T_W} a_{61} = \frac{T_1}{T_2} a_{51} a_{62} = \frac{T_1}{T_2} a_{52}$$

$$a_{63} = \frac{T_1}{T_2} a_{53} a_{65} = \frac{T_1}{T_2} a_{55} + \frac{1}{T_2} a_{66} = -\frac{1}{T_2}$$

그림 1로부터 AVR과 PSS가 동작하고 있는 경우, 계자속의 변화는 식 (2)와 같이 된다.

$$\Delta\psi_{fd} = \frac{K_3}{1+sT_3} \left[-K_4\Delta\delta + (\Delta\nu_s - \frac{1}{1+sT_R} (K_6\Delta\psi_{fd} + K_5\Delta\delta)) G_{ex}(s) \right]$$

식 (2)로부터 PSS에 의한 계자속의 변화는 $\Delta\nu_s$ 와 $\Delta\psi_{fd}$ 에 관련됨을 알 수 있으므로, PSS에 의하여 발생하는 계자속의 변화는 식 (3)과 같이 되고,

$$\Delta\psi_{fd}(\text{due to PSS}) = \frac{K_3 G_{ex}(s)}{1+sT_3} \left(\Delta\nu_s - \frac{K_6}{1+sT_R} \Delta\psi_{fd} \right)$$

식 (3)으로부터 식 (4)를 구할 수 있다.

$$\Delta\psi_{fd}(\text{due to PSS}) = \frac{K_3 G_{ex}(s) (1+sT_R)}{(1+sT_3)(1+sT_R) + K_3 K_6 G_{ex}(s)} \Delta\nu_s$$

PSS에 의한 전기적토크의 변화는 식 (5)와 같이 되고,

$$\Delta T_e(\text{due to PSS}) = K_2 (\Delta\psi_{fd} \text{ due to PSS})$$

식 (4)를 식 (5)에 대입하면, PSS에 의한 전기적토크는 식 (6)과 같다.

$$\Delta T_{PSS} = \Delta T_e(\text{due to PSS}) = K_2 (\Delta\psi_{fd} \text{ due to PSS})$$

$$= \frac{K_2 K_3 G_{ex}(s) (1+sT_R)}{(1+sT_3)(1+sT_R) + K_3 K_6 G_{ex}(s)} \Delta\nu_s$$

그림 1로부터 PSS의 출력은 식 (7)과 같이 되므로,

$$\Delta\nu_s = K_{STAB} \frac{sT_W}{1+sT_W} \frac{1+sT_1}{1+sT_2} \Delta\omega$$

식 (7)을 식 (6)에 대입하면 PSS에 의한 전기적토크의 변화는 최종적으로 식 (8)과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta T_{PSS} = \frac{K_{STAB} K_2 K_3 G_{ex}(s) (1+sT_R) sT_W (1+sT_1)}{[(1+sT_3)(1+sT_R) + K_3 K_6 G_{ex}(s)] (1+sT_W) (1+sT_2)} \Delta\omega$$

식(8)은 $\Delta\delta$ 과 $\Delta\omega$ 의 성분으로 분해되는 데, $\Delta\delta$ 에 관련되는 계수가 동기화토크 계수이고, $\Delta\omega$ 에 관련되는 계수가 댐핑토크 계수로서, 전자는 과도안정도와 관련되는 것이고, 후자는 저주파동요(미소신호안정도)와 관련되는 것이다.

4. 사례검토

PSS의 위상보상 특성이 계통의 과도안정도와 저주파동요에 미치는 영향을 평가하기 위하여, 다음과 같은 1기 무한대 모선 계통에서 위상보상에 따른 동기화토크 계수와 댐핑 토크 계수의 변화를 검토하였다.

그림 2는 555MVA 급 화력발전기 4대가 무한대 모선으로 표현한 계통에 전력을 공급하는 것을 나타내며, 계통의 리액턴스는 2220MVA, 24kV를 기준으로 단위값으로 표현하였다.

여기서는 2번 선로가 고장으로 차단된 후의 저주파동요를 검토한다.

발전기 및 2번 선로 차단 후의 계통관련 정수는 다음과 같고,

$$P_t = 0.9 \quad Q_t = 0.3 \quad E_t = 1.0 \angle 36^\circ \quad E_B = 0.995 \angle 0^\circ$$

$$H = 3.5 MW \cdot s / MVA \quad X_d = 1.81 \quad X_q = 1.76 \quad X_d' = 0.3$$

$$R_E + jX_E = j0.65 \quad X_L = 0.16 \quad R_d = 0.003 \quad T_{do} = 8.0s$$

$$A_{sat} = 0.031 \quad B_{sat} = 6.93 \quad \Psi_{TI} = 0.8 \quad L_{adv} = 1.65 \quad L_{adq} = 1.66$$

$$R_{fd} = 0.0006 \quad L_{fd} = 0.153 \quad K_{sd} = K_{sq} = 0.8491 \quad K_D = 0$$

사이리스터 여자기 및 PSS 관련정수는 다음과 같다.

$$K_A = 200 \quad T_R = 0.02s$$

$$K_{STAB} = 9.5 \quad T_W = 1.4s \quad T_1 = 0.154s \quad T_2 = 0.033s$$

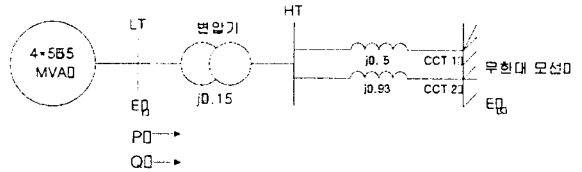


그림 2 1기 무한대모선 계통

PSS가 제공하는 위상보상특성은 결국 PSS 위상보상회로의 시정수 T_1, T_2 를 조절하므로서 얻을 수 있다.

본 논문에서는 PSS가 제공하는 위상보상량이 변할 수 있도록 T_1, T_2 를 변화시키면서, 이들의 변화에 대한 동기화토크와 댐핑토크 성분의 변화를 식 (8)에 의하여 구한다.

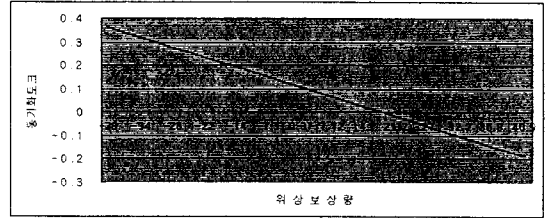


그림 3 동기화토크 변화

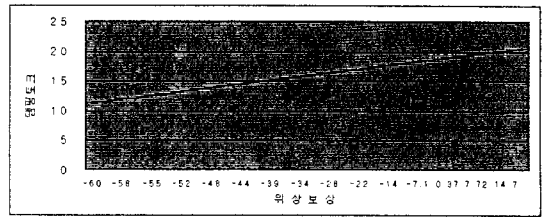


그림 4 댐핑토크 변화

모의 계통의 여자시스템, 계자회로, 그리고 계통에 의한 위상지연 약 20°였으며, 이에 따라, 그림 3에서 보는 바와같이 이 위상지연을 초과해서 과다보상한 경우 음의 동기화토크를 제공하며, 부족보상을 한 경우에는 양의 동기화토크를 제공한다. 그러나, 그림 4에 나타나 있는 것처럼 부족보상을 할수록 PSS가 제공하는 댐핑토크의 양은 감소하므로 일반적으로는 약간의 부족보상을 하게 된다.

5. 결론

본 논문에서는 PSS의 적정위상보상을 결정하기 위한 기초로서 위상보상에 따른 동기화토크와 댐핑토크의 변화를 검토하였다. 본 논문의 검토결과, 약간의 부족보상을 하는 것이 동기화토크와 댐핑토크 측면에서 유리함을 알 수 있었다. 본 논문은 하나의 주파수에서 검토한 것으로, 궁극적으로는 PSS가 동작해야 할 0.1~3.0Hz의 동요주파수 대역에서 이와같은 위상보상에 따른 계통안정도의 변화를 검토하여, PSS가 동작하는 동요주파수 전역에서 최적으로 되는 위상보상량을 결정하고자 한다.

[참고 문헌]

- [1] P.Demello, C.Concordia, "Concepts of synchronous machine stability as affected by excitation control", IEEE PAS-88, NO.4, 1969.4
- [2] E.V.Larsen, "Applying power system stabilizers", IEEE PAS-100, NO.6, 1981.6
- [3] P.Kundur, "Application of power system stabilizers for enhancement of over system stability", IEEE Tran. Power systems, Vol.4, NO.2, 1989.5