PSS 튜닝을 위한 기본 연구 Part I : 계통 운전조건에 대한 토오크 특성 분석

論 文
48A-9-2

A Basic Study for Tuning Power System Stabilizer Part I : Analyzing the Torque Characteristics of Power System Corresponding to Operating Conditions

金 東 俊* · 文 英 煥** · 金 泰 均*** · 申 政 勳***
(Dong-Joon Kim · Young-Hwan Moon · Tae-Kyun Kim · Jung-Hoon Shin)

Abstract-The basic concepts, which are related to the PSS tuning conditions and performance conditions for the safe of determination of PSS gain and compensation of phasor lagging, are thoroughly investigated in this first part. The performance conditions, where the power system has the lowest inherent damping torque and PSS should provide maximum damping torque, are examined by analysing synchronizing torque and damping torque supplied by the voltage control loop at the oscillation frequency. PSS tuning conditions are also investigated by observing the phasor lagging and the gain, resulted from power system-generator-excitation system depending on operating conditions, such as generator active power, reactive power, transmission impedance and AVR gain. The basic concepts developed in this Part I make it possible to lay foundation for the discussion of PSS tuning in Part II.

Key Words : PSS tuning conditions, performance conditions, synchronizing torque, damping torque

1. 서 론

대형 전력계통에서 PSS의 적용은 송전계통이 취약계통(weak system)이고 중부하로 운전되는 경우 특히 발생할 수 있는 0.2~2.5 Hz 사이의 동요를 억제시켜, 송전전력 증대를 도모하는 것이 주 목적이다. 이러한 동요의 억제는 PSS를 여자시스템에 추가 도입함으로써 여자시스템의 제어루프가 발전기/여자기에서 발생하는 위상 지연을 보상하고, 발전기 속도변화의 위상과 동일한 전기적 토오크를 발생시켜 전력계통에 댐핑을 제공함으로써 나타난다.[1] 발전기 여자시스템에 부가된 PSS는 계통조건이 가장 불안정한, 즉 계통이 가장 작은 댐핑을 갖는 운전점에서 최대의 댐핑 토오크를 제공되도록 설계되고 튜닝 되어야 한다. 그러나 과거 30여년 동안 PSS 튜닝에 관련된 많은 논문이 발표되고 좋은 해석 프로그램이 개발되었음에도 불구하고 전력계통의 독특한 특성 때문에 그 튜닝이 어렵고 아직까지 표준화된 PSS 튜닝절차는 없으며 여전히 많은 연구가 행해져야 할 과제로 남아 있다. 전력계통 운전조건은 매 순간 부하가 변동하여 일정하지 않으며, 미소신호 안정도뿐만 아니라 과도안정도에 큰 영향을 미치는 송전선로의 임피이던스도 증설 또는 개폐 등의 이유로 계통구성이 변하기 때문에, 이러한 폭 넓은 운전조건을 만족시키는 PSS 튜닝은 매우 어렵다.

* 正 會 員 : 韓國電氣硏究所 硏究員
** 正 會 員 : 韓國電氣硏究所 · 工博
*** 正 會 員 : 韓電 電力硏究員 電力系統 硏究室 硏究員
接受日字 : 1998年 12月 1日
最終完了 : 1999年 8月 5日

실계통에 PSS장치 튜닝을 행함에 있어서, 어떤 부하조건에서 그리고 어떤 계통조건에서 튜닝해야 하는가는 동요가 발생할 때 계통을 불안정하지 않고 최대의 댐핑 토오크를 제공하는데 있어 매우 중요하다. Larsen[2] 등은 Demello[1] 등이 사용한 1기 무한 모선 모델을 이용하여 PSS 튜닝조건(tuning condition)에 대하여 좋은 지침을 제시하였다. 제시된 튜닝조건에 의하면 계통-발전기-여자기의 이득이 가장 크고 발전기/여자기의 위상 지연이 가장 큰 운전조건일 때이다. 이 조건에서 튜닝된 PSS는 전력계통이 어떤 부하조건에서 운전하든지, 혹은 송전선로가 어떻게 변하든지 간에 계통 불안정을 초래하지 않고 댐핑 토오크를 제공하게 된다. 이러한 튜닝조건은 전력계통이 가장 작은 댐핑 토오크를 갖는 운전조건인 최소안정조건(least stable condition)과 차이가 있다. Larsen 등에 의해서 제시된 PSS 튜닝조건은 가장 댐핑 토오크가 작은 운전조건과 구별된다는 것은, PSS 튜닝 방법에 있어서 새로운 방향을 제시했다는 점에 대해서 그 의의가 매우 크다. 그러나 Larsen 등은 구체적인 데이터나 그림 등을 제시하지 않고 단지 계통 운전조건이 변할 때 PSS 튜닝 운전조건에 대해서 간단히 기술하였으며, 댐핑 토오크가 가장 작은 운전조건에 대해서는 거의 기술되어 있지 않다.

PSS 튜닝에 대한 본 논문은 총 2편으로 이루어져 있으며, 첫 편인 본 논문에서는 먼저 참고문헌[1]에서 사용된 Heffron-Philips 1기 무한 모델을 모델링 하였다. 그리고 K 상수들과 발전기 동요방정식 그리고 여자시스템에 의해서 제공되는 동기화 토오크와 댐핑 토오크에 대한 특성을 알고자 두 가지 전달함수를 정의하였다. 첫 번째 전압제어루프 전달함수(PGEM)를 이용하여 동요주파수에서 동기화 토크

와 댐핑 토오크 변화를 관찰하여, 댐핑 토오크가 가장 작은 운전조건을 확인하고 분석하였다. 그리고 두 번째 전달함수(PGE)를 이용하여 Larsen 등이 기술한 PSS 튜닝조건에 대해서 발전기 유효출력, 송전선 임피이던스 뿐만 아니라, 발전기 무효출력 그리고 AVR 이득을 변화시켰을 때 계통-발전기-여자기(PGE)에서 발생하는 위상 지연특성과 이득변화에 대해 분석하였다. 이와 같이 본 Part I에서는 PSS 기본 개념과 계통 운전조건에 따른 계통 특성을 이해하는데 중점을 두었으며, 논문 part II에서 다루게 될 PSS 튜닝조건에서의 위상보상과 이득 결정에 대한 기초 지식이 되도록 하였다.

2. 1기 무한 모선 모델링

본 절에서는 참고문헌[1]에서 사용된 Heffron - Philips 1기 무한 모델을, PSS 개념 이해를 도모하기 위해서, 그대로 수식 전개하고 이 모델에 대한 선형화 블록을 유도하였다. 그림 1은 발전기가 외부 임피이던스를 통해서 무한 모선에 연결된 계통도와, 이때 발전기의 내부전압 e_q, 정상상태 단자전압 e_{to} 그리고 무한 모선 전압 E를 페이서로 보여 주고 있다. 발전기 모델은 그림 2와 같은 계자쪽의 회전자 다이나믹만 고려된 2축 모델로써, 발전기의 포화와 고정자쪽의 변압기 전압성분 그리고 제동권선(damping winding)을 생략한 모델이다. 따라서 계자의 회전자 다이나믹만 고려된 이 발전기 모델은 단지 여자기를 통해서 제공되는 안정도 효과만을 검토할 수 있다. 그림 2는 발전기 모델의 회로도와 이것을 전달함수 블록도로 구성했을 때의 블록도를 나타낸다.

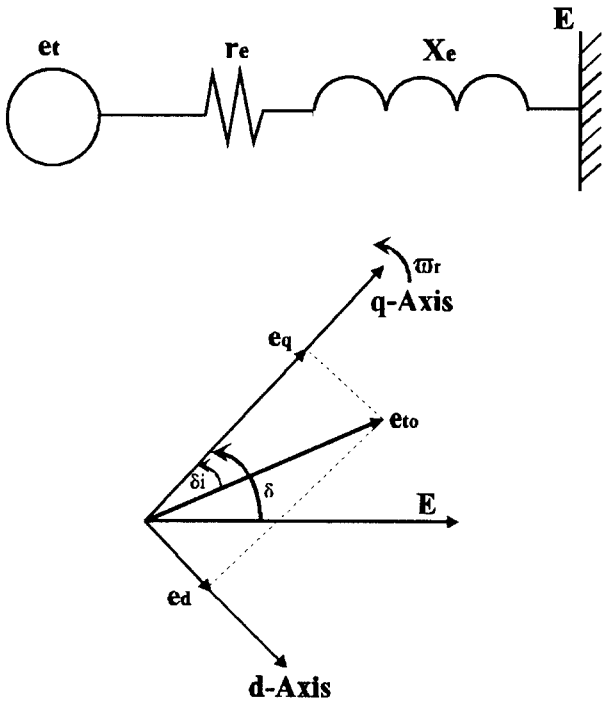

그림 1 1기 무한모선 계통도와 페이서도
Fig . 1 One machine with infinite bus and phasor diagram

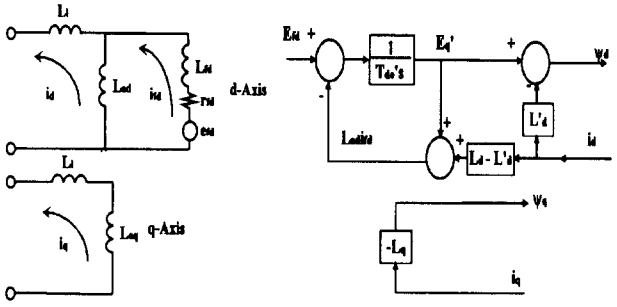

그림 2 계자쪽 회전자 다이나믹만 고려된 2축 발전기 모델
Fig. 2 Two-axis generator model considering the field circuit dynamics only

위의 1기 무한 모선을 수식으로 정리하고 선형화 하면 그림 3과 같이 K상수들을 갖는 블록도를 그릴 수 있다. [1]

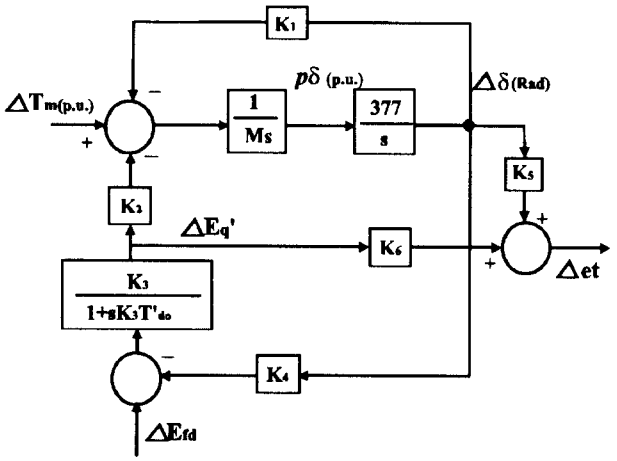

그림 3 1기 무한모선 선형 블록도
Fig. 3 Linearized block diagram of one machine with infinite bus

위 모든 K상수들은 발전기의 부하조건과 송전선로의 임피이던스에 따라 변화하기 때문에 운전조건이 변하면 그 값도 각기 달라진다. 앞의 선형화된 블록도에서, d축의 쇄교자속(flux linkage, Eq')이 일정하다고 가정하면 그림 3에서 토오크(△T)-속도(Pδ)-위상각(△δ) 루프만 생각할 수 있다. 이때 나타나는 토오크는 제동 토오크(braking torque)가 된다. 제동 토오크는 동기화 토오크(synchronizing torque)와 댐핑 토오크(damping torque)로 나눌 수 있고, 동기화 토오크는 회전자의 위상각과 일치되는 위상에서 발생되는 전기적 토오크이며, 댐핑 토오크는 속도와 위상이 같을 때 발생하는 전기적 토오크이다. 그리고 위 시스템에 여자시스템이 부가된다면 마찬가지로 여자시스템에서도 위와 같은 제동 토오크를 제공한다.

댐핑 토오크 위상은 동기화 토오크 위상보다 90° 앞서있다. 이 댐핑 토오크의 제공은 PSS가 없는 발전소에서는 발전기의 댐핑 권선과 터어빈의 마찰에 의해서 제공될 수 있고, 계통측면에서는 일반적으로 모선 부하특성에 따라서 양의 댐핑 혹은 음의 댐핑을 제공할 수 있다. 부하모델링을

일정 임피이던스로 모델링 하는 것이 일정 전류나 일정 MVA모델로 모델링하는 것보다 댐핑 정도가 크다. 발전기 모델에서나 기타 과도안정도 프로그램에서 요구되는 발전기 댐핑 계수 D는 발전기가 제공하는 댐핑을 나타내지 않고, 대신 발전기에 물려있는 부하의 주파수 변화에 대한 댐핑 정도를 나타낸다. 초기 과도안정도 프로그램에서 부하모델링이 되지 않은 경우 사용되었으나, 현재 안정도 프로그램은 모선의 부하 모델링이 쉽게 되므로 일반적으로 영으로 설정한다. 터어빈 마찰에 의한 댐핑 제공의 표현은 터어빈 모델의 D_t라는 댐핑계수를 이용하여 표현되나, 터어빈이 정격속도 부근에서 운전시는 그 값은 미약하여 생략하고 있다. 그리고 발전기의 댐핑권선에 의한 댐핑 제공 효과는 고차 발전기 모델을 이용해서 나타내며, 그 값은 작지만 발전기의 양의 댐핑 계수 D와 같은 효과를 발생한다. 본 논문에서는 오직 발전기의 여자시스템과 전압제어루프에서 제공되는 토오크만 고려하므로 이와 같은 댐핑 토오크를 나타내는 모델링은 무시한다.

3. 여자시스템에 의한 제동 토오크 제공

3.1 속응성 여자 시스템 모델링

만약 여자기가 응답속도가 아주 빠른 속응성 정지형 여자시스템이라면 여자시스템은 여자기를 뺀 단지 AVR만 모델링 해도 충분하게 된다. 여자시스템 함수를 GEX(s)라 하고 전달함수로 나타내면 식 (1)와 같이 정의할 수 있다.

$$G_{EX}(s)=\frac{\triangle E_{fd}}{\triangle e_t}=\frac{K_A}{1+sT_A} \tag{1}$$

T_A는 AVR의 시정수로 보통 0.03초에서 0.05초 사이의 값을 갖는다. AVR의 실제 이득 K_A 값의 범위는 200~400 pu 정도의 값을 갖으며, 정상상태에서는 높은 AVR 이득 값에 의해서 발전기 전압 변동율을 작게 한다. 그러나 과도 상태에서의 큰 AVR 이득은 안정도를 나쁘게 하므로, 일반적으로 AVR은 지연-지상회로나 안정화회로를 또한 가지고 있어 과도 상태시 이득을 줄어들게 한다. 식 (1)에서의 K_A의 값의 범위는 과도 상태시의 이득을 나타내고, 그 범위는 약 20~50 p.u. 값을 갖는다.

3.2 전압제어루프에 의한 토오크 제공

그림 3의 1기 무한모선 선형 블록도에 식 (1)의 여자시스템이 있는 경우, 회전자 위상각이 기기 안정도에 미치는 영향은, 단자전압 기준값 (et_{ref})이 변화지 않는다고 가정했을 때, 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 식(2)는 계통-발전기-여자시스템-기기의 전달함수이고, 이것을 본 논문에서는 PGEM(s)로 정의한다.

$$PGEM(s)=\frac{\triangle T_{ep}}{\triangle \delta}\mid_{\triangle et_{ref}}=\frac{-K_2K_3K_4-K_2K_3K_5G_{EX}(s)}{K_3T'_{do}s+K_6K_3G_{EX}(s)+1}$$
$$=\frac{-sT_AK_2K_3K_4-K_2K_3K_4-K_2K_3K_5K_A}{s^2K_3T'_{do}T_A+s(T_A+K_3T'_{do})+K_3K_6K_4+1} \tag{2}$$

식 (2)는 발전기 위상각 변화에 대한 계통에 제공되는 제동 토오크를 나타낸다. 정상 상태에서는 s = 0 이므로 계통에 제공되는 제동 토오크는 발전기 위상각의 위상과 같기 때문에 동기화 토오크만 제공하게 된다. 주파수가 높아지면, 각 K상수들에 의해서 식 (2)는 두개의 토오크, 즉 동기화 토오크와 댐핑 토오크를 계통에 제공하게 된다. 식 (2)에서의 제동 토오크는 계통조건에 따른 여러 K상수들의 변화에 의해서 값이 정해진다. 식 (2)의 전달함수를 이용하여 아래 절에서는 제동 토오크에 대해서 자세히 고찰한다.

4. PSS 기본 개념

PSS를 통해서 제공되는 댐핑 토오크는 앞에서 정의한 것과 같이 회전자의 속도($p\delta$)와 동상인 전기적 토오크를 말한다. PSS의 입력신호를 발전기의 회전자의 속도라 가정하고 회전자의 위상각 변화가 없다고 한다면, PSS의 전달함수 PSS(s)와 계통-발전기-여자기 전달함수는 그림 8과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 PGE(s)는 계통-발전기-여자기의 전달함수로 아래와 같이 정의된다.

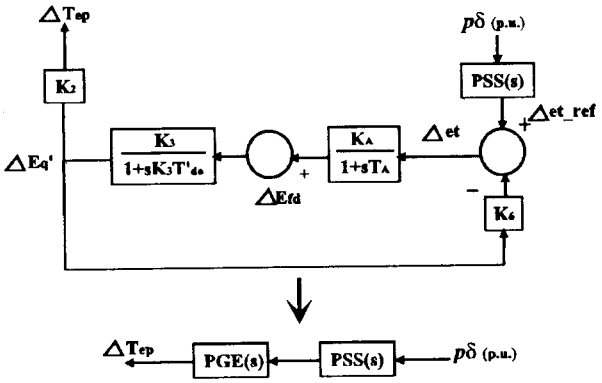

그림 4 발전기 안정화장치 PSS가 있는 블록도
Fig. 4 Block diagram with power system stabilizer

그림 4에서 회전자 속도와 전기적 토오크 사이에 발전기와 여자기에 의한 위상 지연이 없다면 이 전기적 토오크는 회전자의 속도와 같은 위상을 갖는 댐핑 토오크와 동일하다. 위와 같이 PSS가 PGE(s)함수에서 발생되는 위상지연을 보상해준다면, PSS가 포함된 전압안정루프에서는 오직 양의 댐핑 토오크만 제공하게 된다. PSS의 위상보상에 대해서 수식적으로 표현하면 아래와 같다. PSS(s)와 PGE(s)의 전달함수에서 제공되는 댐핑 토오크 값을 D_{pss}라고 한다면,

$$PSS(s)=\frac{D_{pss}}{PGE(s)} \tag{3}$$

여기서, PGE(s)는

$$PGE(s)=\frac{\Delta T_{ep}}{\Delta E_{ref}}\Big|\Delta\delta=\frac{K_2K_3GEX(s)}{1+sK_3T'_{d0}+K_6K_3GEX(s)}$$
$$=\frac{K_2K_3K_A}{(1+sT_A)(1+sK_3T'_{d0})+K_6K_3K_A}$$
$$=\frac{K_2K_3K_A}{s^2T_AK_3T'_{d0}+(T_A+K_3T'_{d0})s+K_6K_3K_A+1} \tag{4}$$

식 (4)의 발전기/여자기에서 발생하는 위상 지연은 2개의

K상수, K3와 K6가 중요한 역할을 한다. 이 두 상수는 발전기가 무부하 개방회로 상태에서는 1의 값을 갖지만, 계통과 연결되어 있을 경우에는 운전조건에 따라서 그 값이 달라진다. 계통의 운전조건은 수시로 변하고 이에 따라 두개의 상수도 변화하여 발전기/여자기의 위상지연은 일정하지 않다. 이러한 발전기/여자기의 위상지연이 계통 운전조건에 따라서 변화하는 것은 PSS(s) 위상보상을 어렵게 만든다. 그리고 PSS(s) 이득 결정은 그 값이 크면 클수록 댐핑 토오크가 크게되어 동요를 빠르게 감소시킬 수 있으나, PSS이득을 너무 크게 하는 경우, 계통 이득이 큰 운전조건 하에서는 제어모드가 불안정해진다.[3] 아래 절에서는 계통운전조건 변화에 대한 식 (4)의 PGE(s) 함수의 위상지연과 이득에 대해서 분석한다.

5. 계통 운전조건 변화에 대한 계통특성

5.1 계통 운전조건에 따른 K상수들의 변화

본 절에서는 앞에서 유도된 선형화된 1기 무한 모선계통의 K상수들과 전달 함수들을 이용하여 계통 운전조건 변화에 따른 K상수들의 변화에 대해서 고찰한다. 먼저 사용된 발전기는 화력기 발전기로써 그 정수들은 표 1과 같다.

표 1 발전기 정수 값
Table 1 Generator parameters

정 수	화력기 정수 값	비 고
T_{do}'	6.0	계자 시정수
H	5.0	관성 상수
D	0.0	
X_d	1.60	
X_q	1.55	
X_d'	0.32	

선형모델의 변수 값들과 K상수 값들을 한 운전조건에서 어떤 값을 갖는지 살펴보면 다음과 같다. 발전기의 운전조건과 송전선로 임피이던스는 아래와 같고, 이 조건에서 화력기의 계통변수 값들과 K상수 값은 표 2와 같다.

$P+jQ=1.0+j0.0$, et = 1.0, Xe = 0.4, $K_A=50$, $T_A=0.03$

표 2 정상상태에서의 변수 값과 K상수 값
Table 2. Values of K constants and variables in steady state

변수	값	변수	값
E_{qo}	1.8446	E_o	1.0770
i_{do}	0.8403	e_{do}	0.8403
i_{qo}	0.5421	e_{qo}	0.5421
K1	1.1739	K2	1.4683
K3	0.3600	K4	1.8794
K5	-0.1171	K6	0.3012

상기 계통의 변수 값과 K상수 값은 한 운전점에 대해서 구해진 결과이므로 전체적인 계통변화에 대한 K상수들의 변화를 알기는 어렵다. 다음은 정상상태에서 송전선로 임피이던스를 변할 때의 K상수들의 변화에 대한 것이다. 그림 5는 앞서 언급한 발전기 데이터와 계통조건에서 송전선로의 임피이던스만 변화 시켰을 때의 각 K상수의 변화를 보여주고 있다. 계통에서 제공되는 동기화 토오크를 나타내는 K1은 송전선로의 임피이던스가 증가할수록 감소함을 보여주고 있으며, K5는 음의 값으로 증가함을 보여준다. K5가 음수로 증가함은 동기화 토오크 측면에서 바람직한 경향이지만 제동 토오크를 감소시키는 효과를 낸다. 그리고 전체 동기화 토오크는 회전자 위상각 변화에 의해서 발생하는 K5보다 계통에서 제공하는 동기화 토오크 K1의 감소 기울기가 커서 전체적으로 감소한다. 송전선로 증가시 K2의 감소는 계통 이득이 감소함을 보여준다. K3와 K6는 항상 양수 값을 가지며 임피이던스 변화에 대해서 다른 상수보다 민감하지 않다. 계자의 감자작용을 보여주는 K4의 변화는 다른 상수보다 큼을 보여주며 임피이던스가 증가할수록 감소하는 경향이다. 전체적으로 송전선로의 임피이던스가 증가하면 동기화 토오크나 제동 토오크에 나쁜 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

발전기 유효전력이 변할 때나 무효전력이 변할 때 그리고 AVR의 이득이 변할 때의 K상수들의 변화를 또한 위와 같이 고찰할 수 있다. 그러나, 계통운전 조건 변화에 대해서 각각의 K상수들을 하나하나 고찰하는 것은 계통특성을 이해하는데는 어려운 점이 많다. 따라서 다음 절에서는 앞의 계통조건을 기본으로 하여, 발전기 유효출력, 무효출력, 송전선로의 임피이던스 변화 그리고 AVR의 이득이 변할 때의 전압제어루프인 PGEM(s) 함수의 댐핑 토오크와 동기화 토오크를 분석하고, PGE(s) 함수에 대해서는 이득변화와 위상지연을 분석한다.

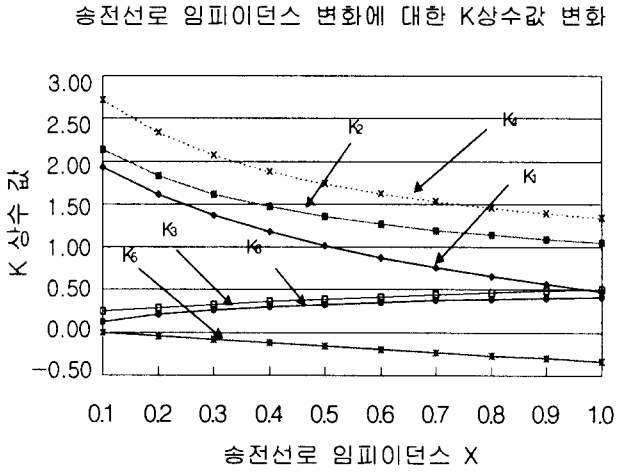

그림 5 송전선로 임피이던스 변화에 대한 K상수 변화
Fig. 5 Variations of K constants corresponding to transmission impedance

6. 계통운전조건에 따른 PGEM(s) 함수의 특성

본 절에서는 동요 주파수에서의 전압제어루프에 의해서 제공되는 토오크가 계통의 운전조건에 대해서 어떻게 변하는가를 살펴본다. 전압제어루프의 전달함수는 앞에서 기술한 식 (2)의 PGEM(s) 전달함수가 된다. 정상상태의 운전조건이 결정되면 식 (2)의 특성방정식에서 동요 주파수를 계산할 수 있다. 여기서 말하는 동요 주파수는 지역모드와 동일하다. 그림 6은 발전기 유효전력을 증가시 전달함수 PGEM(s)에 식 (2)의 동요주파수를 대입하여 계산된 동기화 토오크와 이때의 동요주파수를 보여 준다. 여기서 발전기 유효전력을 증가하면, 동요주파수는 증가함을 알 수 있고 동기화 토오크도 또한 증가한다. 그림 7은 그림 6의 동요 주파수에서 댐핑 토오크를 계산한 것을 보여준다. 경부하시 제동 토오크는 증가하나 중부하시는 제동 토오크가 감소하고 있다.

그림 8과 9는 무효출력이 변할 때의 동요 주파수에서, 동기화 토오크와 댐핑 토오크를 보여준다. 동기화 토오크 감소는 앞에서 기술한 것처럼, 무효전력이 증가하면 K5가 음의 값을 가지고 감소하여 동기화 토오크를 증가시키는 방향으로 움직이지만, K5의 양의 동기화 토오크 증가율보다 K1이 갖는 음의 동기화 토오크 감소율이 더 크기 때문이다. 이때의 전압제어루프에서 제공되는 댐핑 토오크는 K5가 음의 값을 갖고 감소함으로 무효전력이 증가할수록 감소한다.

그림 10와 11은 송전선로 임피이던스가 증가할 때, 동요 주파수에서의 동기화 토오크와 제동 토오크를 보여준다. 임피이던스가 증가하면 두 토오크는 감소하는 방향으로 움직인다. 그림 12과 그림 13은 AVR의 이득 K_A가 증가시, 전압제어루프에서 제공되는 두 토오크를 보여준다. 이득 K_A를 증하면 동기화 토오크를 증가시키지만 반대로 댐핑 토오크를 줄이는 효과가 있음을 보인다. 즉, AVR의 이득이 큰 속응성 여자시스템은 동기화 토오크에 좋은 영향을 주지만, 미소신호 안정도면에서는 부정적인 영향을 끼친다는 기존의 문헌결과와 일치한다.

위의 결과로써, 가장 작은 댐핑 토오크가 제공되는 계통운전 조건은, AVR 이득에 대한 결과를 제외하면, 발전기가 지상 운전하면서 중부하로 운전되고 송전선로의 임피이던스가 큰 약 계통인 경우이다. 이 운전조건에서 동기화 토오크를 먼저 살펴보면, 발전기가 출력(Pe)이 높을 수록 동기화 토오크가 증가하기 때문에 동기화 토오크 측면에서는 상황이 그리 나쁘지는 않다. 그러나 이 운전조건에서는 댐핑 토오크가 가장 작은 운전조건이 되어 가장 큰 댐핑 토오크를 필요로 하게된다. 그리고 PSS에 의해서 댐핑 토오크가 최대로 공급되어야 할 조건이 된다. 이러한 운전 조건을 성능조건(performance condition) 혹은 최소안정조건(least stable condition)이라고 불리고 있다. 이 성능조건에서 PSS를 튜닝하여 최대의 댐핑 토오크를 제공하도록 하는 것이 바람직하나, 앞에서 언급했듯이 PSS 튜닝은 모든 운전조건에 대해서 불안정을 초래하지 않아야 되므로 다음 절에 기술할 PSS 튜닝조건에서 행해져야 한다.

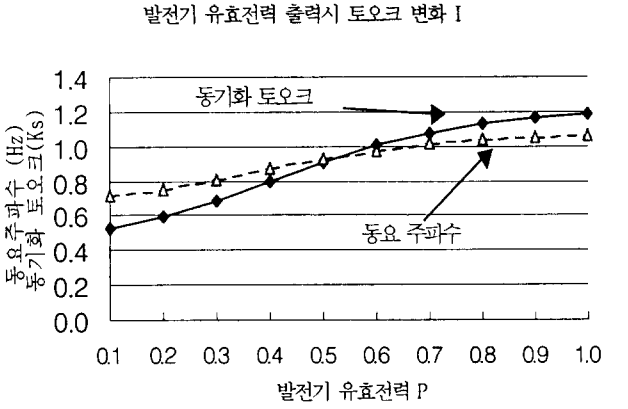

그림 6 PGEM(s) 함수에서 유효 출력변화에 대한 토오크 변화 I(동요주파수에서)

Fig. 6 Variations of torque corresponding to active power in damped frequency I

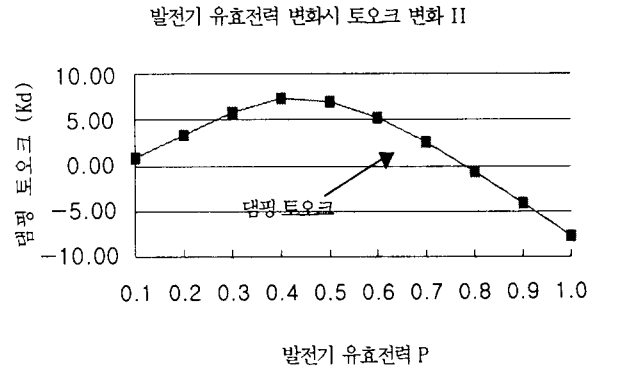

그림 7 PGEM(s) 함수에서 유효 출력변화에 대한 토오크 변화 II (동요주파수에서)

Fig. 7 Variations of torque corresponding to active power in damped frequency II

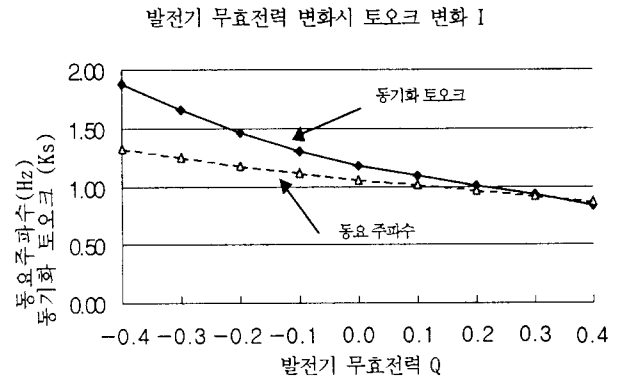

그림 8 PGEM(s) 함수에서 무효 출력변화에 대한 토오크 변화 I (동요주파수에서)

Fig. 8 Variations of torque corresponding to reactive power in damped frequency I

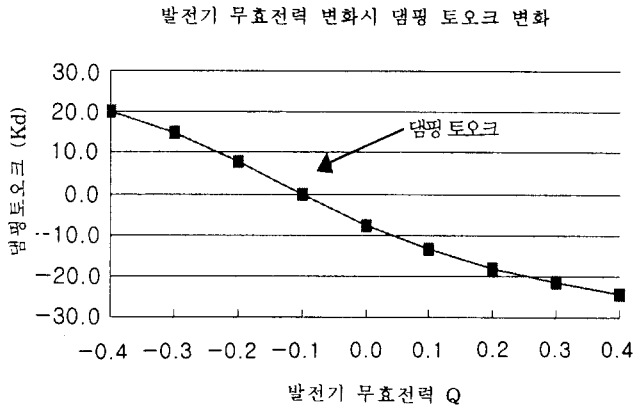

그림 9 PGEM(s) 함수에서의 발전기 무효전력변화에 대한 토오크 변화 II (동요주파수에서)

Fig. 9 Variations of torque corresponding to reactive power in damped frequency II

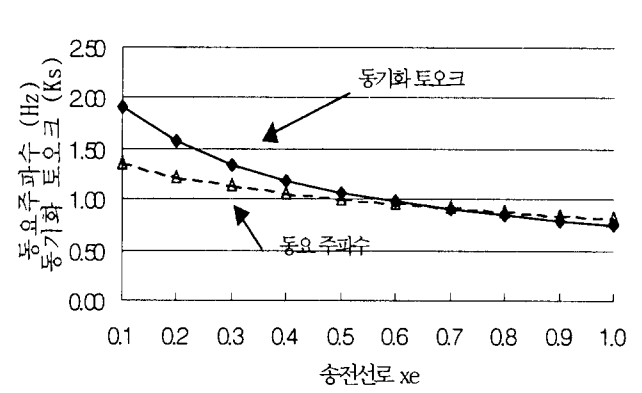

그림 10 PGEM(s) 함수에서의 송전선로 임피이던스 변화에 대한 대한 토오크 변화 I (동요주파수에서)

Fig. 10 Variations of torque corresponding to transmission impedance in damped frequency I

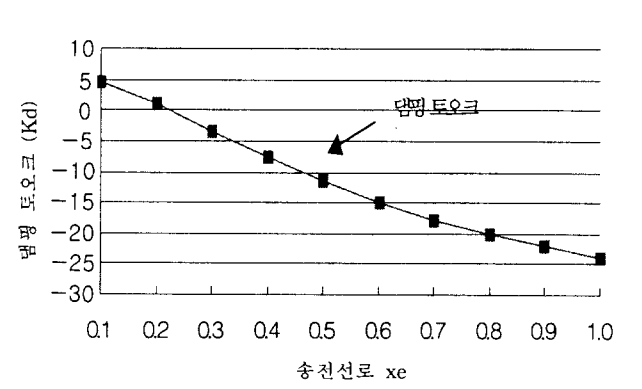

그림 11 PGEM(s) 함수에서의 송전선로 임피이던스 변화에 대한 토오크 변화 II (동요주파수에서)

Fig. 11 Variations changes of torque corresponding to line impedances in damped frequency II

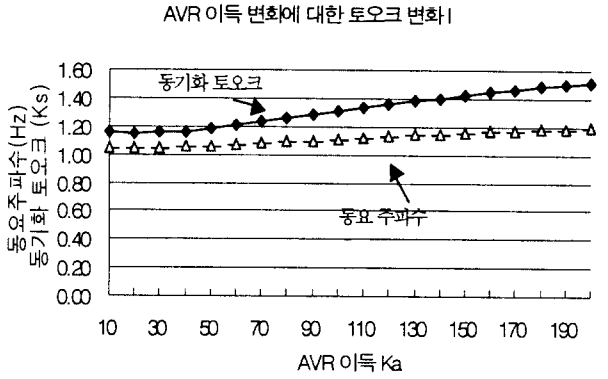

그림 12 PGEM(s) 함수에서의 AVR 이득변화에 대한 대한 토오크 변화 I (동요주파수에서)

Fig. 12 Variations of torque corresponding to AVR' s gain in damped frequency I

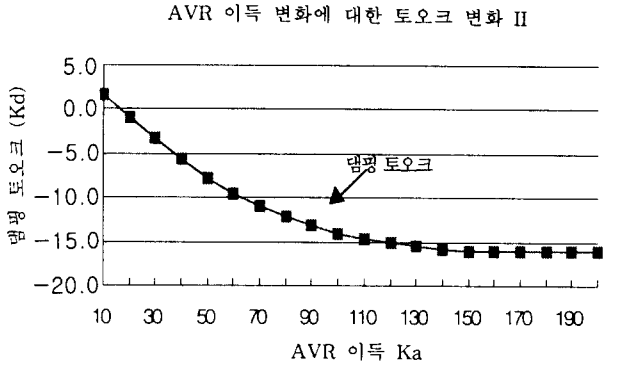

그림 13 PGEM(s) 함수에서의 AVR 이득변화에 대한 토오크 변화 II (동요주파수에서)

Fig. 13 Variations of torque corresponding to AVR's gain in damped frequency II

7. 계통 운전조건에 따른 PGE(s)함수의 특성

7.1 PGE(s) 함수의 위상지연

앞에서 언급한 바와 같이 PGE(s) 전달함수의 위상지연은 발전기/여자기에서 발생하는 위상지연과 같다. 따라서 PSS(s) 전달함수가 PGE(s) 전달함수에서 발생하는 위상 지연을 완전하게 보상 해주면 계통에 댐핑 토오크만 제공할 수 있다. 그러나, PGE(s) 함수는 계통 운전조건 변화에 따라 위상 지연이 각기 다르다. 그림 14는 발전기 유효출력을 변했을 때 나타나는 PGE(s) 전달함수의 위상지연을 보여준다. 발전기가 중부하로 갈수록 위상 지연이 크다는 것을 보여준다. 그림 15는 발전기에서 나가는 무효전력이 증가할수록 위상지연이 상대적으로 무효전력이 발전기로 들어오는 경우보다 적음을 보여준다. 그림 16은 송전선로 임피이던스 변화에 대하여 PGE(s)함수의 위상지연을 보여준다. 송전선로 임피이던스가 작을수록 상대적으로 위상지연이 크다.

그림 17은 위상지연이 가장 작을 조건인 발전기 유효출력이 적고 무효전력이 큰 경우의 한 부하조건에서의 PGE(s) 전달 함수의 위상지연과 발전기가 개방 회로이고 무부하시

의 위상지연을 비교한 것이다. 이때의 부하조건은 P+jQ=0.1+j0.4이다. 그림 9는 개방 회로이고 무부하시의 위상지연이 부하시의 위상지연보다 적음을 보여준다. 실제로 무부하시의 위상지연은 항상 부하시의 위상지연보다 적다.

일반적인 PSS 위상보상은 댐핑 토오크를 증가 시키면서 동기화 토오크를 훼손하지 않거나 혹은 미소하게 나마 제공하는 부족 보상방법으로 행해지고 있다. 개방회로 무부하시의 위상지연으로 PSS를 위상보상 한다면 다양한 계통운용 조건에 대해서 항상 위상이 부족보상으로 되어 댐핑 토오크를 제공하면서 동기화 토오크를 제공할 수 있는 보상이 된다. 그러나 댐핑 토오크가 가장 요구되는 중부하인 경우에 최대의 댐핑 토오크를 제공 못하는 단점을 갖는다. 반대로 가장 위상지연이 크고 댐핑 토오크가 가장 적은 중부하에서 위상을 보상할 경우, 그 운전점에서 최대의 제동 토오크를 제공할 수 있도록 보상이 되지만, 위상 지연이 상대적으로 적은 운전점에서는 위상이 과보상이 되어 동기화 동오크를 감소시키는 부정적인 영향을 초래한다. 일반적인 PSS 위상보상 튜닝은 최대의 위상지연이 발생하는 운전점에서 약 20° ~ 40° 정도로 부족보상으로 한다. 그러나 실계통의 PSS의 위상보상은 PSS가 설치되는 발전기의 운전범위와 계통사항을 고려하여 적절한 운전조건에서 효과적인 위상보상을 해야 할 것이다. 만약 발전기와 연결된 계통이 충분한 동기토오크가 제공된다면 부족보상 위상이 위의 값보다 더 적을 수 있다.

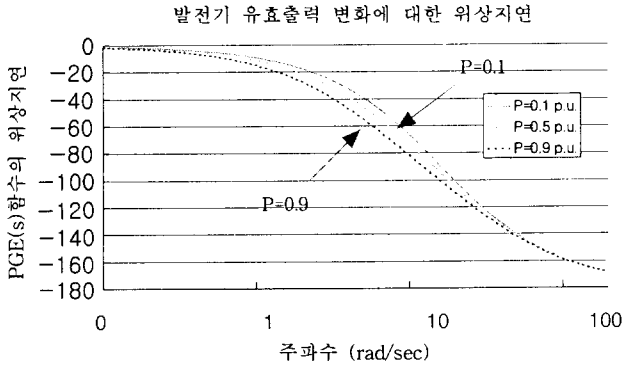

그림 14 발전기 유효 출력변화에 대한 PGE(s)의 위상지연
Fig. 14 PGE(s)' s phasor lag corresponding to active Power

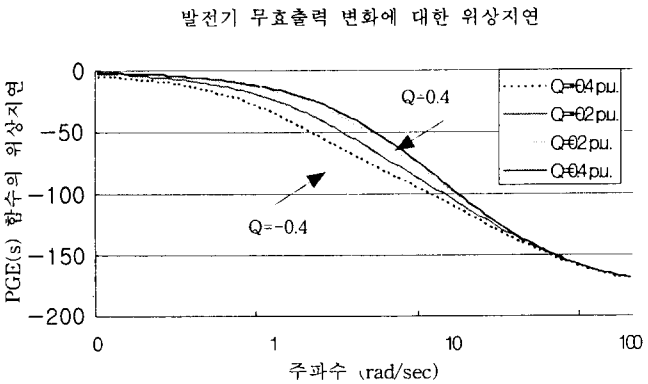

그림 15 발전기 무효출력에 대한 PGE(s)의 위상지연
Fig. 15 PGE(s) phasor lag corresponding to reactive power

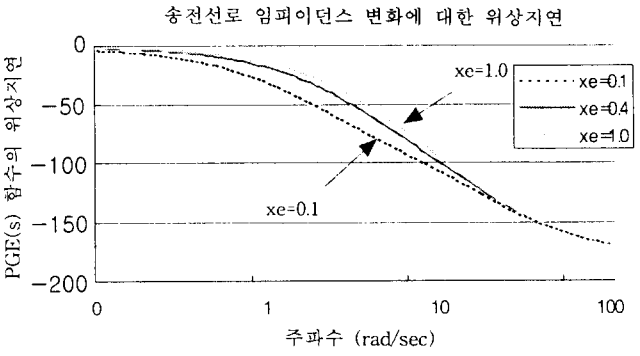

그림 16 송전선로 임피이던스 변화에 대한 PGE(s)위상지연
Fig. 16 PGE(s) phasor lag corresponding to transmission impedance variation

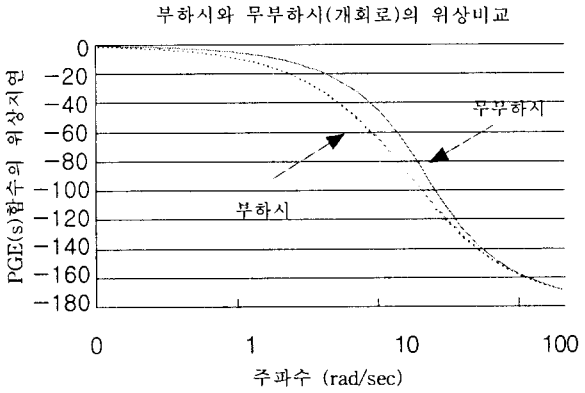

그림 17 무부하시와 부하시의 PGE(s)의 위상지연 비교
Fig. 17 Plots of no-load phasor lag(open circuit) and on-load phasor lag

7.2 PGE(s) 전달함수의 이득 변화

본 절은 정상 상태시($j\omega$=0.0) 계통 운전조건 변화에 대한 PGE(s) 전달함수의 이득 변화를 분석하였다. 동요 주파수에서의 이득변화는 정상상태에서의 이득변화의 경향과 같다. 그림 18은 발전기 유효출력 변화에 대한 PGE(s)함수의 이득변화를 보여주고 있다. 유효전력이 증가할수록 이득이 커짐을 알 수 있다. 그림 19는 발전기 무효전력이 진상으로 감소할 수록 PGE(s) 전달함수의 이득이 증가하다가 어느 시점에서 다시 이득이 감소함을 보여준다. 그림 20은 송전선로 임피이던스가 감소할 수록 PGE(s)이득이 증가함을 보여준다. 그림 21은 AVR의 과도이득 K_A가 증가할 때 PGE(s)함수의 이득이 증가함을 보여준다. 앞 절의 운전조건이 변할 때 PGE(s)함수의 위상지연과 본 절의 이득변화를 연관지어 고찰하면, PGE(s) 위상지연이 큰 운전조건 일수록 이득이 크다는 것을 알 수 있다. 따라서 송전선로가 강건한 계통이고, 발전기 유효출력이 크며 무효전력이 적을수록 PGE(s) 전달함수의 위상지연이 커지고 이득이 큼을 알 수 있다.

PSS의 이득 튜닝은 입력신호에 대한 특성을 고려하지 않는다면 이러한 PGE(s) 함수가 이득이 가장 큰 운전점에서

해야 한다. 이와 같은 운전점에서 PSS 이득 튜닝은, 쉽게 불안정으로 가는 제어 모드(혹, 여자기 모드)가 고려되면서, 계통에 가장 큰 댐핑 토오크를 제공하도록 한다. 따라서 이 득이 가장 큰 이 운전점에서 PSS 이득이 튜닝이 된다면, 다른 어떤 운전조건에 대해서도 제어모드의 불안정 없이 안정하게 PSS를 운전할 수 있는 보장이 된다.

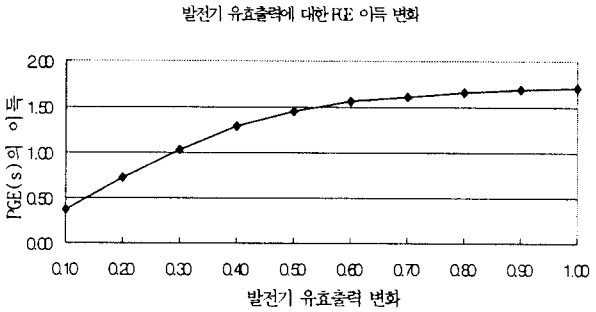

그림 18 발전기 유효출력 변화시 PGE(s) 이득 변화
Fig. 18 Variations of PGE(s)' s gain corresponding to active power

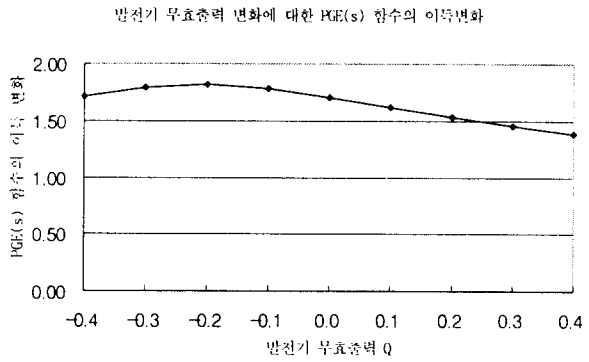

그림 19 발전기 무효전력 변화시 PGE(s) 이득 변화
Fig. 19 Variations of PGE(s)' s gain corresponding to reactive power

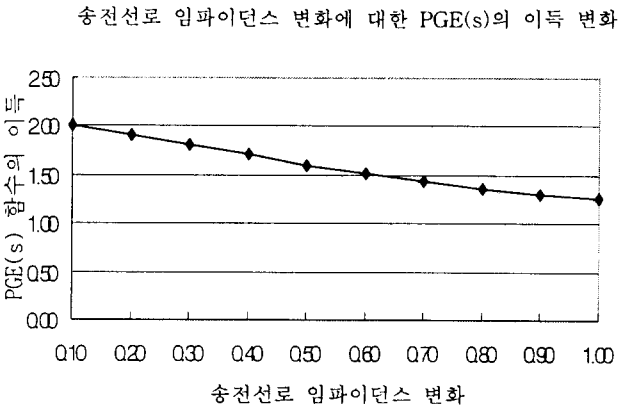

그림 20 송전선로 임피이던스 변화에 대한 PGE(s) 이득 변화
Fig. 20 Variations of PGE(s)' s gain corresponding to transmission impedance

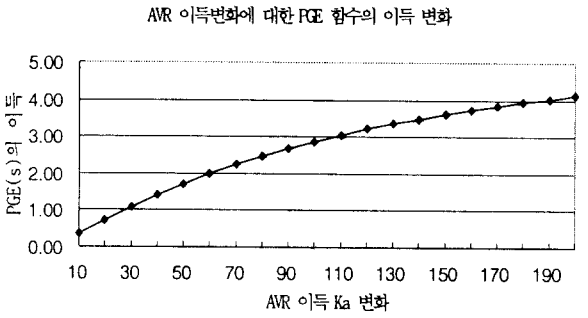

그림 21 AVR 이득 변화에 대한 PGE(s) 이득 변화
Fig. 21 Variations of PGE(s)' s gain corresponding to AVR's gain

8. 결 론

본 논문에서는 PSS튜닝을 위한 운전조건을 찾기 위해서 1기 무한 모선 계통을 이용하여 계통의 운전조건을 다양하게 변화시켰을 때, 안정도가 가장 작은 운전조건을 분석하였다. 그리고, 계통-발전기-여자계의 위상지연과 이득 그리고 동기화 토오크와 댐핑 토오크에 대해서도 분석하였다. 여기서 얻어진 결론은 다음과 같다.

[1] 동요주파수에서 전압제어루프(PGEM)에서 제공되는 댐핑 토오크와 동기화 토오크를 이용하여, 댐핑 토오크가 가장 작은 운전조건은 발전기가 무효전력이 지상이며 유효전력이 고출력으로 운전되고, 송전선로는 임피이던스가 작은 약 계통임을 확인하였다. 또한, AVR의 이득이 클 경우 동기화 토오크는 증가시키나, 댐핑 토오크는 감소시킴을 분석하였다.

[2] PGE(s) 전달함수의 위상지연이 가장 클 운전조건은 발전기가 고출력으로 운전되는 경우이고 송전선로 임피이던스가 작은 강건한 계통임을 확인하였다. 그리고 무효전력은 진상으로 갈수록 위상지연이 증가함을 분석하였다. 또한, 무부하, 개방회로시의 PGE(s) 전달함수의 위상지연은 부하시보다 항상 적음을 분석하였다

[3] PGE(s) 전달함수의 이득이 가장 클 운전조건은 발전기가 고출력으로 운전되는 경우이고 송전선로 임피이던스가 작은 강건한 계통일 때임을 확인하였고, 무효전력은 진상일 때 이득이 큼을 분석하였다. 그리고 AVR 이득이 증가하면 PGE(s) 전달함수의 이득은 커짐을 분석하였다.

[4] PSS 이득튜닝 조건은 PSS 입력신호에 대한 고려를 하지 않는 경우 PGE(s) 전달함수 이득이 가장 클 운전조건임을 확인하였다. 이 운전조건에서 PSS 이득튜닝은, 제어기 모드의 안정도를 보장하면서, PSS가 계통에 최대의 댐핑 토오크를 제공하도록 하게 한다.

논문 Part II에서는 본 논문에서 얻어진 결과를 이용하여, PSS 튜닝조건에서 PSS 위상보상과 이득 결정 등에 대해서 상세히 살펴본다.

참 고 문 헌

[1] F.P.de Mello and C.Concordia, " Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-88, April 1969, pp.316-329

[2] E.V.Larsen and D.A.Swann, "Applying Power System Stabilizers : Parts I,II and III , IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, 1981, pp.3017-3046

[3] P. Kundur, D.C. Lee, H.M. Zein, El-Din, Power System Stabilizers for Thermal Units: Analytical Techniques and On-Site Validation , IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, pp.81-95, Jan. 1981

[4] Prabha Kundur, Power System Stability and Control, McGraw-Hill,1994, pp 179-181

[5] P.Kundur, M.Klemin, G.J. Rogers and M.S. Zywno, " Application of Power System Stabilizer for Enhancement of Overall System Stability," IEEE Trans., Vol. PWRS-4, pp. 614-626, May 1989.

[6] "발전기 제어계통 안정화장치(PSS) 개발 연구" , 중간보고서 , 한국전력공사 전력연구원, 1999.1

[7] "전력계통 안정도 해석용 발전기 제어계 모델 결정에 관한 연구", 최종보고서, 한국전력공사, 전력연구원, 1996.10

저 자 소 개

김 동 준 (金 東 俊)
전기학회 논문지 제48A권 제8호 참조
Tel : (0551) 280-1318
E-mail : djkim@keri.re.kr

문 영 환 (文 英 煥)
전기학회 논문지 제48A권 제8호 참조
Tel : (0551) 280-1311
E-mail : yhmoon@keri.re.kr

김 태 균 (金 泰 均)
전기학회 논문지 제48권 제 4호 참조
Tel : (0551) 865-5831

신 정 훈 (申 政 勳)
1993년 경북대학교 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 졸업(석사). 1995년 한국전력공사 입사, 현재, 전력연구원 전력계통연구실 계통 안정화그룹 근무