

퍼지형 전력계통안정화제어기의 실계통 적용 및 안정도 향상

최 경선
한국전기연구소

이 동인, 이 광식
영남대학교

Application of Fuzzy-PSS to KEPCO power system and stability enhancement

Kyung-Sun Choi
KERI

Doing-In Lee · Kwang-Sik Lee
Yeungnam Univ.

(Abstract)

The importance of dynamic stability of power system is increasing as the excitation system using static type are greatly enlarged. There are several types of PSS at present. Elements of PSS consist of Notch filter, lead-lag filter, washout, limiter which are variable. The existing power system has a difficulty in determining the optimal PSS parameters whenever PSS is installed. And it is recommended to retune PSS parameters periodically because system characteristics change due to aging. In this paper, intelligent PSS using fuzzy concept is introduced to get over difficulties mentioned above. The usefulness of Fuzzy-type PSS was verified by applying FPSS to KEPCO power system. Generally, the voltage regulation deteriorates if conventional PSS is applied because supplementary signal is added into AVR summing point to damp power oscillation. In this paper this problem is solved by AVR limiter and fuzzy membership tuning.

1. 서 론

우리나라 전력계통은 부하증가수준을 만족시키기 위하여 발전기 및 송전선로확충을 하고 있다. 특히 최근에 설치되는 대부분의 발전기 제어계는 과도안정도 향상을 위해 속응성이 있는 정지형 여자방식용 제어하고 있고, 디지털화 되고 있다. 응답율이 2.0이상이 되는 빠른 제어를 사용하던, 채용된 발전기의 과도안정도는 향상될 수 있으나, 이 비율이 높아지면, 소신호안정도는 악화될 우려가 있다. 여기서 소신호안정도란, 계통에 미소한 외란이 침입되었을 때, 기기간·지역간에 전력 수요가 정상상태에서도 지속되는 정도를 의미한다. 이 안정도를 동적안정도(Dynamic Stability)라고도 부른다. 동적안정도 해석은, 시스템에 미소신호를 인위적으로 인가했을 때, 입출력간의 관계를 상태방정식을 구하고, 이 상태방정식의 고유행렬의 고유치해석을 구함으로써 이루어진다. 계통의 용동이 빨라짐으로써, 동적 안정도가 악화되어 여기에 대한 대책으로서 전력계통안정기(Power System Stabilizer)가 설치되고 있다. 그러나 도입되는 모든 발전기에 이 PSS를 사용하는 것은 바람직하지 않으며, 고유치해석에 의한 동적안정도 해석을 하여 불안정모드에 가까운 지점에 PSS를 설치하여야 한다. 그렇지 않고 도입되는 모든 발전기에 PSS를 설치하면, 오히려 동적안정도를 더 악화시킬 수 있다. 이 동적안정도는 과도안정도와 밀접한 관련이 있으며, 동적안정도가 나쁜 발전기 주위에 계통사고가 발생하면, 최악의 경우 탈조의 위험성도 있다. 최근 많이 도입/설치되고 있는 대부분의 PSS는 notch 필터(Notch filter), 앞섬-뒤짐 필터(lead-lag filter), 워시아웃 필터(Washout filter), 리미터(Limiter)로 구성된다. 이 PSS는 각 요소의 특성을 계통상황에 따라 운전자가 가변할 수 있도록 제작되어 있다. 즉, 처음 설치될 때, PSS의 최적 파라미터를 설치되는 발전기의 특성에 맞추어 PSS의 각 요소를 튜닝하

여야 한다. 뿐만 아니라, 발전기 및 제어계 특성의 경년변화로 인해 주기적으로 최적의 PSS파라미터를 재 튜닝하여야 한다. 본 논문에서는 퍼지개념을 도입한 PSS를 제안하고자 한다. 퍼지형 PSS는 입력변수(Crisp량)를 퍼지화(퍼지량)하고, 추론기관과 관계법칙을 거쳐 퍼지형태의 제어량이 결정된다. 실제 플랜트에 인가되기 전에 퍼지량은 다시 비퍼지화과정을 거친 후, Crisp량으로 인가된다. 이 퍼지형 PSS의 장점은 제어 법칙을 관계법칙에 의해 결정되고, 이 관계법칙은 물리적인 성질과 운전원의 경험에 의해 정해진다. 따라서, 기존의 PSS와 같은 별도의 튜닝방법이 필요 없을 뿐 아니라, 운전점이 변화되어도 PSS파라미터를 재튜닝하는 불편도 없다. 또한 시스템에 대한 정보를 수확하여 제어법칙을 결정하는 기존의 방식과는 달리 단순히 관계법칙에 의해 제어신호가 결정되므로, 기존의 PSS보다도 제어를 실제 구현하기가 용이하다.

그리고, 디지털 자동전압조정기(Automatic Voltage Regulator)를 사용하는 시스템의 경우, 퍼지형 PSS를 적용하면 마이크로프로세서의 계산시간이 짧으므로, 실시간 제어기 구성이 간단하다.

일반적으로, PSS를 적용할 경우, 전력동요는 억제되거나 발전기의 전압변동율은 악화되기 쉽다. 이것은 PSS의 과도 동작에 의한 것인데, 계략적으로 PSS의 경우 그 출력단에 리미터를 두어 PSS의 출력의 상한과 하한을 제한하게 된다. 본 논문에서는 이 리미터의 값을 퍼지 법칙과 소속함수내에 포함시켰다. 그리고, 적용대상 발전기의 AVR내의 리미터도 그 상한값을 적절한 튜닝함으로써, 계통사고시에 발전기출력동요를 억제할 뿐 아니라 발전기의 단자전압도 격저치를 유지할 수 있도록, 제어를 설계하였다. 퍼지형 PSS의 유용성을 검증하기 위하여, 한국의 실제계통중, S회력에 퍼지 PSS를 적용하고 그 효과를 확인하였다.

2. 본 론

2.1 퍼지 집합이론

대상물들(objects)의 모임으로 구성되는 어떤 X를 전체 집합이라 하고, X내에 퍼지집합 A가 존재한다고 하자. 이때, 전체 집합에 속하는 어떤 x가 퍼지집합 A에 속할 정도를 소속함수라 규정하고, 기호로서 $\mu_A(x)$ 로 나타낸다. 퍼지집합 A를 수식으로 표현하면, 아래와 같다.

$$A = \{(x, \mu_A(x)) | x \in X\} \quad (1)$$

$\mu_A(x)$ 의 값은 0~1사이의 값으로서, 1에 가까울수록, x가 A에 속할 확률이 매우 높음을 의미한다. 만약 $\mu_A(x)$ 의 값은 0 혹은 1로만 제한한다면, A는 crisp집합이 된다.

2.1.1 퍼지집합의 교집합 동작

두 개의 퍼지집합 A, B가 있고 각각에 대한 소속함수를 $\mu_A(x), \mu_B(x)$ 라 하자. 이때 두 소속함수의 교집합동작은 아래와 같이 정의된다. 즉, 퍼지집합에서의 교집합은 최소값을 취

하는 동작과 같다.

$$\mu_{A(x)} = \min(\mu_{A(x)}, \mu_{B(x)}) \quad x \in X \quad (2)$$

2.1.2 퍼지집합의 합집합 동작

마찬가지로, 두 개의 퍼지집합 A, B가 있고 각각에 대한 소속함수를 $\mu_A(x), \mu_B(x)$ 라 하자. 이때 두 소속함수의 교집합동작은 아래와 같이 정의된다. 즉, 퍼지집합에서의 합집합은 최대값을 취하는 동작과 같다.

$$\mu_{D(x)} = \max(\mu_{A(x)}, \mu_{B(x)}) \quad x \in X \quad (3)$$

2.1.3 퍼지집합의 부정집합 동작

어떤 퍼지집합 A가 있고, 여기에 대한 소속함수 $\mu_A(x)$ 라 하면, $\mu_{CA}(x)$ 의 부정을 수식으로 표현하면 식 (4)와 같다.

$$\mu_{CA}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad x \in X \quad (4)$$

2.1.4 퍼지집합간의 관계 동작

두 개의 퍼지집합 A, B가 있고 각각에 대한 소속함수를 $\mu_A(x), \mu_B(x)$ 라 할 때, 퍼지집합 A와 B와의 관계를 $R: A \rightarrow B$ 를 소속함수에 의해 수식으로 표현하면, 식 (5)와 같다.

$$\mu_{B(y)} = \max_x (\min(\mu_R(x, y), \mu_A(x))) \quad (5)$$

2.2. 퍼지형 PSS의 설계

전력계통안정기(PSS)는 정상상태 및 과도시에 전력동요를 억제하기 위하여 PSS의 출력신호(보조신호)를 자동전압조정기(AVR)의 합성점에 인가해 줌으로써, 진동을 억제하여 안정도를 향상시키는 장치이다. PSS출력신호가 인가되는 위치는 그림 1의 AVR 모델(EXST3)에서 V_S 에 해당된다. 퍼지 PSS의 전체구성도는 그림 2와 같다. PSS의 입력신호로는 가속도, 속도, 유효출력중에서, 하나가 선택되는 것이 일반적이나 퍼지 PSS에서는 관계법칙을 사용하기 위하여 속도편차와 가속도편차 두 신호를 입력으로 사용하였다. 즉, 최적의 PSS신호를 얻기 위해 속도편차와 가속도편차 두 신호사이의 관계를 법칙화하여 이로부터 PSS출력신호를 얻는다.

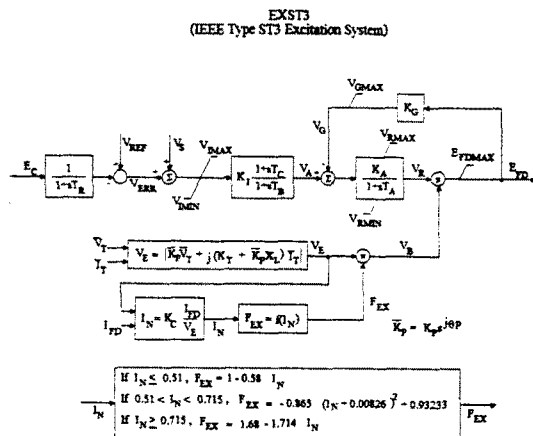


그림 1. 여자시스템 모델(EXST3)의 전달함수도

$$E_T = \begin{cases} 1.0 & \text{if } I_N \leq 0.51, F_{EX} = 1 - 0.58 I_N \\ 0.51 < I_N < 0.715, F_{EX} = -0.863 (I_N - 0.00826)^2 - 0.03233 \\ 0.715 \leq I_N, F_{EX} = 1.68 - 1.714 I_N \end{cases}$$

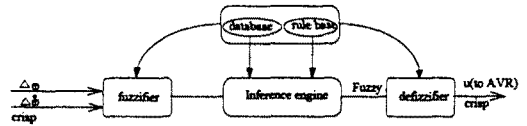


그림 2. 퍼지형 PSS의 기능블럭도

PSS입력신호인 속도편차신호는 발전기축의 속도로서 직접 얻을 수 있는 값이며, 가속도편차는 속도편차로부터 계산에 의해 구한다.식(6)

$$\Delta \dot{\omega}(k) = (\Delta \omega(k) - \Delta \omega(k-1)) / \Delta T \quad (6)$$

여기서 ΔT 는 샘플링 시간이다.

2.2.1. 퍼지 관계법칙(Relation Rule)의 결정

PSS 출력신호는 퍼지 관계법칙으로 결정된다. 즉, PSS출력신호는 PSS의 두 입력신호인 속도편차와 가속도편차간의 관계로부터 결정된다. 먼저, 두 입력량을 LP(large positive), MP(medium positive), SP(small positive), VS(very small), SN(small negative), MN(medium negative), LN(large negative)의 7개 언어로 구분한다. 두 입력량이 각각 7개의 언어로 표현되므로, 두 입력량의 법칙에는 49개의 법칙이 발생한다. 이 관계법칙은 표 1과 같다.

표 1. 퍼지 PSS의 관계법칙

$\Delta \omega$ / $\Delta \dot{\omega}$	LN	MN	SN	VS	SP	MP	LP
LP	VS	SP	MP	LP	LP	LP	LP
MP	SN	VS	SP	MP	MP	LP	LP
SP	MN	SN	VS	SP	SP	MP	LP
VS	MN	MN	SN	VS	SP	MP	MP
SN	LN	MN	SN	SN	VS	SP	MP
MN	LN	LN	MN	MN	SN	VS	SP
LN	LN	LN	LN	LN	MN	SN	VS

표 1.의 관계법칙을 언어적으로 표현한다면, 아래와 같다.

- Rule 1 : IF $\Delta \omega$ is LP and $\Delta \dot{\omega}$ is LN, then V_S is VS.
- Rule 2 : IF $\Delta \omega$ is LP and $\Delta \dot{\omega}$ is MN, then V_S is SP.
- Rule 3 : IF $\Delta \omega$ is LP and $\Delta \dot{\omega}$ is SN, then V_S is MP.
- Rule 4 : IF $\Delta \omega$ is LP and $\Delta \dot{\omega}$ is VS, then V_S is LP.

RULE 49 : IF $\Delta \omega$ is LN and $\Delta \dot{\omega}$ is LP, then V_S is VS.

2.2.2. 일출력량의 소속함수 지정

PSS의 입력량은 실제 0.01~0.1오더(order)의 작은 값이므로 이것을 소속함수화 하기 위해서는 정규화할 필요가 있다. 각 입력량에 대한 정규화한 수식은 아래와 같다.

$$\Delta \omega_n = \frac{\Delta \omega}{0.01} \quad (7)$$

$$\Delta \dot{\omega}_n = \frac{\Delta \dot{\omega}}{0.1} \quad (8)$$

식 (7)과 (8)에 의해 정규화된 안정화장치의 입력신호는 7개의 언어표현에 대한 소속함수에 의해 표현가능하다. 입력량에 대한 소속함수를 표로서 나타내면 아래와 같다.

표 2. PSS입력신호의 소속함수

소속함수 $\Delta\omega \ \Delta\dot{\omega}$	LN	MN	SN	VS	SP	MP	LP
-1.0	1	0.7	0.5	0.3	0	0	0
-0.2	1	0.9	0.7	0.5	0.2	0	0
-0.1	0.8	1	0.9	0.6	0.4	0.2	0
-0.05	0.6	0.8	1	0.9	0.6	0.4	0.2
0	0.4	0.6	0.8	1	0.8	0.6	0.4
0.05	0.2	0.4	0.6	0.9	1	0.8	0.6
0.1	0	0.2	0.4	0.7	0.9	1	0.8
0.2	0	0	0.2	0.5	0.7	0.9	1
1.0	0	0	0	0.3	0.5	0.7	1

입력신호 $\Delta\omega$ 와 $\Delta\dot{\omega}$ 의 값이 각각 -0.2, 1.0이라면, 표 2.로부터 다음과 같은 퍼지집합으로 나타낼 수 있다.

$$\Delta\omega \{ (LN, 1), (MN, 0.9), (SN, 0.7), (VS, 0.5), (SP, 0.2), (MP, 0), (LP, 0) \} \quad (9)$$

$$\Delta\dot{\omega} \{ (LN, 0), (MN, 0), (SN, 0), (VS, 0.3), (SP, 0.5), (MP, 0.7), (LP, 1) \} \quad (10)$$

표 1.의 관계법칙으로부터 나오는 PSS의 출력신호에 대한 소속함수는 49개의 퍼지법칙에 대해 각각 결정되며, 다음은 그 가운데 한 예를 나타낸 것이다.

Rule 1 : IF $\Delta\omega$ is LP and $\Delta\dot{\omega}$ is LN, then V_s is VS.

여기서, V_s 는 PSS 출력신호이다. 관계법칙 1은 $\Delta\omega$ 가 LP이고, $\Delta\dot{\omega}$ 가 LN일 경우 PSS의 출력신호 ΔV_s 가 VS인 경우인데 이 출력신호에 대한 소속함수를 퍼지집합으로 표현하면 다음과 같다.

$$\Delta V_s \{ (\mu_R(x_i, LN), 0), (\mu_R(x_i, MN), 0), (\mu_R(x_i, SN), 0.5), (\mu_R(x_i, VS), 1), (\mu_R(x_i, SP), 0.5), (\mu_R(x_i, MP), 0), (\mu_R(x_i, LP), 0) \} \quad (11)$$

2.2.3 MIN/MAX동작에 의한 PSS출력신호의 결정

퍼지 PSS의 출력신호는 MIN/MAX동작에 의해 결정된다. PSS출력 결정과정을 정리하면 아래와 같다.

(1)IF-PART의 MIN동작 적용

예를 들어 $\Delta\omega$ 가 LP이고, $\Delta\dot{\omega}$ 가 LN일 경우에 서로 AND조건이므로 MIN동작을 적용한다. 즉,

$$\begin{aligned} \mu(x_1) &= \mu(' \Delta\omega \text{ is LP and } ' \Delta\dot{\omega} \text{ is LN}) \\ &= \min(\mu(' \Delta\omega \text{ is LP})(' \Delta\dot{\omega} \text{ is LN})) \\ &= \min(1, 0.8) \\ &= 0.8 \end{aligned}$$

(2)관계법칙에 MIN동작적용

이 단계는 식(5)와 같은 관계법칙에 MIN동작을 취하는 것으로 관계법칙 1에 이를 적용하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \mu V_{s,1}(LN) &= \min(\mu_R(x_1, LN), \mu(x_1)) \\ &= \min(1, 0.8) \\ &= 0.8 \end{aligned}$$

(3)전체 관계법칙에 MAX동작적용

이 단계는 단계 (2)의 과정을 나머지 48개의 관계법칙에 모두 적용하고 난 전체 49개의 결과에 대한 MAX동작을 적용하는

것이다. 단, PSS출력이 LN일 경우에 대해서만 적용한 것으로 한다.

$$\begin{aligned} V_s(LN) &= \max(\mu V_{s,1}(LN) \mu V_{s,2} \dots (LN) \mu V_{s,49}(LN)) \\ &= \max(0, 0.0, \dots, 0.5, 0, 0, 0.5) = 0.5 \end{aligned}$$

(4)7개의 PSS신호에 MAX동작적용

끝으로, 단계(1)~단계(3)까지의 과정을 나머지 PSS출력신호 6가지에 대해서 적용하고 난 후, 전체 7가지의 결과에 MAX동작을 적용한다.

$$V_s = \max((\mu V_s(LN) \mu V_s(MN) \mu V_s(SN) \mu V_s(VS) \mu V_s(SP) \mu V_s(MP) \mu V_s(LP)))$$

3. 사례연구

퍼지형 PSS의 유용성을 검증하기 위하여 66기의 주요발전기로서 구성되는 KEPCO 전력계통을 사용하였다. 현재 PEAK시의 전체 조류계산을 수행하고, S파력발전기(소신호안정도가 비교적 취약한 곳)의 과도시 전력동요에 대해 대해 과도안정도 해석을 하고, PSS유무시의 효과를 확인하였다. S파력 발전기데이터는 아래와 같다.

S발전기의 여자기모델은 정지형여자시스템 모델 중의 하나인 EXST3이며, 입력데이터는 아래와 같다. 또한 S발전기 형식은 원통형이다.

표 3. 여자시스템모델(EXST3)의 입력데이터

정수명	값	정수명	값
T _R	0.05	V _{DMN}	0.0
V _{DMAX}	0.2	K _G	1.0
V _{DMN}	-0.2	K _P	4.52
K _J	200	K _I	4.51
T _C	1.0	EFD _{MAX}	5.45
T _B	10.0	K _C	1.43
K _A	8.59	X _L	0.091
T _A	0.4	V _{GMAX}	5.35
V _{RMAX}	1.0	θ _p	20

표 4. 발전기 모델의 입력데이터

발전기 정수명	S발전기의 계정수값
T' _ω	5.273
T'' _ω	0.0334
T' _ω	0.405
T'' _ω	0.07
H	2.957
D	0
X _d	1.801
X _{d'}	1.726
X _{d''}	0.278
X _{d'''}	0.435
X _{d''''} =X _{d''''}	0.19
X _i	0.159
S(1.0)	0.0869
S(1.2)	0.232

표 3. 표 4.의 데이터는 부하차단시험 및 AVR 계단과 응답시험에 의해 나온 입력데이터로부터 모델링한 값이다.[7]

퍼지형 PSS를 설계통에 적용하기 위해서, 전력계통안정도 해석용 상용소프트웨어인 PSS/E[5]를 활용하였다. 그림 3은 PSS/E의 과도안정도 모의수준을 나타낸 것이다. 안정도해석용 계통데이터는 발전기계어제 특성시험에 의해 구한 데이터를 대부분 사용하였으며, 그렇지 않은 발전기계어제 데이터는 제작처 및 전형적인 값을 사용하였다.[6] 모의시나리오는 PSS가 없을 경우, 제라식 PSS가 있을 경우, 퍼지형 PSS가 있을 경우에 대해 비교하였다. 사용한 상정해석은 발전기 S1의 모선에 3상단락사고를 6사이클동안 적용하고, 발전기의 각 변수, 유효출력, 단자전압, 속도편차, 부하각을 비교하였다.

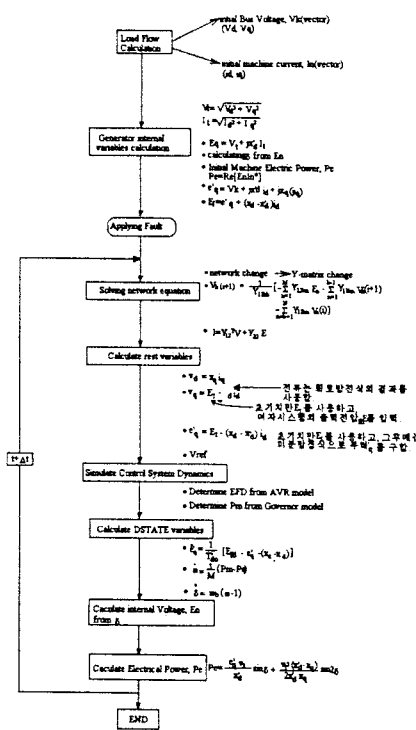


그림 3. 과도안정도 모의절차도

아래 그림 4는 0.1초 순간에 발전기 모선에 3상 단락사고를 일으키고 0.2초에 사고를 제거했을 때의 발전기의 유효출력을 PSS가 없을 경우와 재래적인 PSS적용시, 퍼지형 PSS적용시에 대해 비교한 것이다. 그림5,그림6,그림7은 동일사고 적용시의 발전기 단자전압,속도편차,부하각을 비교한 것이다.

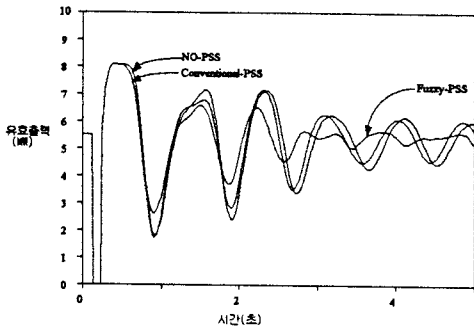


그림 4. 발전기 유효출력의 비교

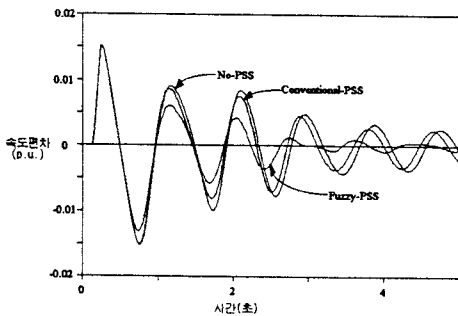


그림 5. 발전기 속도편차의 비교

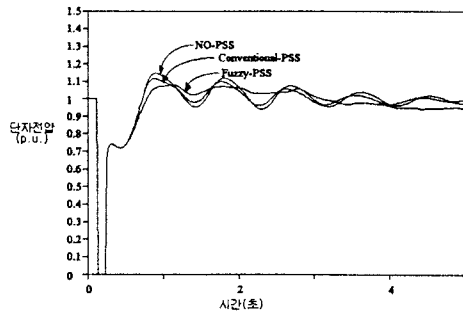


그림 6. 발전기 단자전압의 비교

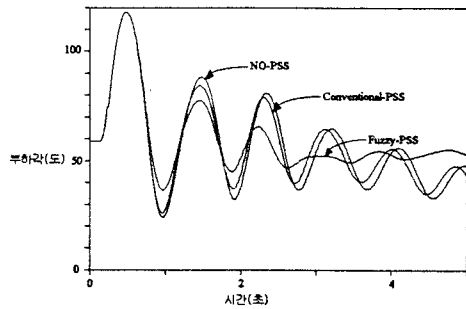


그림 7. 발전기의 부하각 비교

4. 결 론

본 논문에서는 퍼지 제어개념을 전력계통안정기(PSS)에 적용하였으며, 현재 한전계통에 운전중에 있는 PSS와 비교하여, 그 우수성을 한전전력계통에 적용하여 검증하였으며, 다음과 같은 성과를 거두었다.

- (1) 계통사고중에서 가장 약조건인, 발전기에 3상 단락 사고를 적용시켰을 때, 발전기의 재래적 PSS와 퍼지형 PSS의 부하각·속도·유효출력의 응답을 비교 해 본 결과, 퍼지형 PSS의 댐핑 특성의 우수성을 확인하였다.(그림4,그림5,그림7참조)
- (2) 퍼지형 PSS 적용시 발전기의 전압안정성을 확보하기 위해, 여자기 모델의 Limiter와 소속함수의 기울기를 튜닝하였다. 그 결과, PSS 비적용시 및 재래적 PSS 보다 그 전압안정성이 확연히 향상됨을 확인하였다.(그림 6. 참조)
- (3) 본 논문에서 제안한 전압안정성을 고려한 퍼지형 PSS를 한전의 실제계에 적용하여 댐핑 및 전압안정성의 우수성을 입증하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] Kuo, "Power System Stability and Control"
- [2] Kandel Langholz, "Fuzzy Control Systems"
- [3] Marek J. Patyra, Janos L. Grantner, Kirby Koster, "Digital Fuzzy Logic Controller : Design and Implementation", IEEE Transactions on Fuzzy systems, Vol. 4, NO. 4, NOV. 1996
- [4] K.A. El-Metwally, G.C. Hancock, O.P. Malik, "Implementation of a Fuzzy Logic PSS Using a Micro-controller and Experimental Test Results", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 11, No. 1, March 1996.
- [5] T.E. Kostyniak, "PSS/E-24 Power System Simulator", Dec. 1995.
- [6] 한전전력연구원 최종 연구보고서, "전력계통 안정도 해석용 발전기 제어계 모델 결정에 관한 연구", 1996. 10.
- [7] 최경선,문영환,김동준 "부하차단시험에 의한 서인천복합화력 발전기 제어계의 모델링 및 검증", 대한전기학회 논문지, 제 45 권 제 4 호, 1996년 4월