

속도 참여율(SPF)을 이용한 한전계통의 PSS 최적 설치 장소 선정

신정훈* · 김용학 · 김태균 · 홍순천
한국전력공사 전력연구원

The Selection of Suitable locations for PSSs in KEPCO's Power System using Speed Participation Factor

Jeong-Hoon Shin* · Yong-Hak Kim · Tae-Kyun Kim · Sun-Chun Hong
Korea Electric Power Research Institute(KEPRI)

Abstract - This paper presents the selection of suitable locations for PSSs in large power system using Speed Participation Factor(SPF). And practical considerations for optimal locations of PSSs are discussed. In this paper, the simulation results for SPF in KEPCO's power system using SSSP by EPRI are also included.

1. 서 론

전력수요 급증으로 인한 설비확장으로 계통규모가 대형화되는 반면, 발전소 입지선정의 어려움으로 발전기의 단위용량이 증가하는 추세이므로 전 계통 정전사고를 유발할 수 있는 대형발전기의 발전정지 발생 방지대책이 필요하다. 특히, 속응 여자시스템을 갖춘 발전기가 많아짐에 따라 작은 외란에도 발전기 동요가 지속되는 소위, 미소신호 안정도 저하현상이 이미 발생하고 있는 실정이다. 이에 본 논문에서는 대형 발전기에 전력계통 안정화장치(PSS: Power System Stabilizer, 이하 PSS)를 설치하여 외란 발생시 발전기 동요를 신속히 감소시킴으로써 계통의 사고파급을 최소한으로 방지, 계통의 안정적인 운용을 도모하고자 현재 한전 전력연구원에서 진행중인 국산 디지털 PSS 개발연구와 관련, 대규모 한전 계통에서, 개발될 PSS의 설치효과를 극대화하기 위한 위치 선정 방안에 대해 기술하였다.

일반적으로, PSS는 설치되는 발전기 자신의 안정도를 향상시키는 관점에서 설치되고 1기 무한대 계통 모델을 사용하여 설계되고 있다. 따라서, 계통전체의 안정도에 미치는 영향을 직접 평가하는 것이 곤란하며 다수 발전기의 PSS간 상호간섭 등의 문제가 발생될 가능성도 있다. 그러므로, 대기계통의 최적 여자제어 시스템의 설계와 향후 PSS의 효과적인 활용을 위하여 PSS 설치지점 선정에 관한 실용적인 기법을 검토하는 것이 바람직하다. 따라서, 본 논문에서는 실제 계통운용 측면에서 실무적으로 고려할 사항을 포함하여 PSS의 최적 설치위치를 선정하고자 한다. 이를 위하여 먼저, 대규모 계통의 동요 모드 해석 프로그램을 이용하여 고유치와 고유 벡터에 의한 계통전체의 안정도를 평가하고, 고유치에 대한 감도계수(Power Factor) 특히, 발전기 회전자 속도 참여율(Speed Participation Factor)을 사용하여 안정도 향상효과가 큰 발전기 후보를 선정하고 선정된 발전기들에 대해 실무적인 고려 사항을 검토하여 최종적으로 설치장소를 선정하고자 한다[1].

2. PSS 최적 설치 위치 선정 기법

2.1 상태행렬의 고유치 특성

계통의 미소신호 안정도 모델은 일반적인 선형제어 시스템의 상태방정식과 출력방정식과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \Delta \dot{x} &= A \cdot \Delta x + B \cdot \Delta u \\ \Delta y &= C \cdot \Delta x + D \cdot \Delta u \end{aligned} \quad (1)$$

Δx : 동적 상태변수들의 벡터(nxn)

Δy : 시스템의 출력 또는 측정변수(mxn)

Δu : 제어입력 벡터(rx1)

A : 상태 행렬 (nxn), B : 입력 행렬 (nxr)

C : 출력 계수행렬 (mxn), D : 입출력 계수행렬 (mxr)

이때 상태행렬 A의 고유치는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta \bar{x}(s) &= (sI - A)^{-1} [\Delta x(0) + B \Delta \bar{u}(s)] \\ &= \frac{Adj(sI - A) [\Delta x(0) + B \Delta \bar{u}(s)]}{Det(sI - A)} \end{aligned}$$

$$\Delta \bar{y} = C(sI - A)^{-1} [x(0) + B \Delta \bar{u}(s)] + D \Delta \bar{u}(s) \quad (2)$$

여기에서 \bar{x} 의 극점(pole)은 $Det(sI - A)=0$ 또는

$$Det(A - sI)=0$$

을 만족하는 해가 된다. 위의 (2)식을 만족하는 s의 값 $\lambda_i, (i=1, 2, \dots, n)$ 을 상태행렬 A의 고유치라 하며 입력이 없을 경우($u=0$), $e^{\lambda_i t}$ 는 상태방정식을 만족시키며 이를 시스템의 진동모드라 부른다. 또한, 상태행렬의 각 고유치 λ_i 마다 다음 식을 만족하는 좌고유벡터, 우고유벡터 w_i, v_i 가 존재한다.

$$A v_i = \lambda_i v_i$$

$$w_i A = \lambda_i w_i$$

만일, 시스템의 고유치가 서로 다른 경우 우/좌 고유벡터는 직교행렬이 된다.

$$w_i v_j = \delta_{ij} : \text{kronecker delta}$$

여기서, δ_{ij} 를 Kronecker delta라 하는데 $i=j$ 이면 1이고, $i \neq j$ 이면 0이 된다.

$$WV = I \text{ 또는 } W = V^{-1} \quad (3)$$

여기서,

$$V = [v_1, v_2, \dots, v_n]$$

$$W = [w_1^T, w_2^T, \dots, w_n^T]^T \quad (4)$$

한편, $A v_i = \lambda_i v_i$ 이므로,

$$AV = V \Lambda \quad (5)$$

여기서, Λ 는 고유치 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ 를 대각성분으로 갖는 대각행렬이다. 따라서 식(4)와 (5)로부터

$$V^{-1}AV = WAW = \Lambda \quad (6)$$

가 된다. 또한, 식(1)에서 입력이 없을 경우,

$$\Delta \dot{x} = A \Delta x$$

가 되는데 변수 분리(decoupling)를 위해 변수변환을 취하면

$$\Delta \dot{z} = Vz \quad (7)$$

가 되며, 여기서 V는 우고유벡터들의 모드행렬이다.

$$V \dot{z} = AVz \quad (8)$$

따라서,

$$\dot{z} = V^{-1}AVz \quad (9)$$

식(9)에 식(6)을 대입하면, 식(10)과 같으며

$$\dot{z} = \Lambda z \quad (10)$$

이는 아래 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{z}_i(t) = \lambda_i z_i \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (11)$$

(11)식의 해는 1차 미분방정식을 구하는 것이므로 시간함수로 구하면

$$z_i(t) = z_i(0)e^{\lambda_k t} \quad (12)$$

여기서 $z_i(0)$ 는 z_i 의 초기치이다. 또한, 식(7)은 아래와 같으며 (14)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta x(t) = Vz(t) = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \dots \\ v_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1(t) \\ z_2(t) \\ \dots \\ z_n(t) \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\Delta x(t) = \sum_{i=1}^n v_i z_i(0) e^{\lambda_k t} \quad (14)$$

식(13)에서 $z(t)$ 를 구하면

$$z_i(t) = V^{-1} \Delta x(t) = W \Delta x(t)$$

이를 다시 쓰면,

$$z_i(t) = w_i \Delta x(t) \quad (15)$$

$t=0$ 일 경우,

$$z_i(0) = w_i x(0) = c_i$$

이 식을 (14)식에 대입하면

$$\Delta x(t) = \sum_{i=1}^n v_i c_i e^{\lambda_k t} \quad (16)$$

그러므로, i 번째 상태변수의 시간응답은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta x_i(t) = v_{i1} c_1 e^{\lambda_k t} + v_{i2} c_2 e^{\lambda_k t} + \dots + v_{in} c_n e^{\lambda_k t} \quad (17)$$

2.2 참여율(Participation Factor)

식(13)을 다시 쓰면,

$$\Delta x(t) = Vz(t) = [v_1, v_2, \dots, v_n]z(t) \quad (18)$$

따라서,

$$\Delta z(t) = W \Delta x(t) = [w_1, w_2, \dots, w_n]x(t) \quad (19)$$

여기서 우고유벡터 v_i 는 모드 모양을 나타내는데, 어떤 모드가 생기면 이에 대하여 상태변수들의 상대적인 동작을 결정한다. 예를 들어 i 번째 모드에 대하여 상태변수 x_k 의 동작 여부는 우고유벡터 v_i 의 k 번째 요소인 v_{ik} 에 의하여 정해진다. 또한, v_i 의 요소들의 크기는 모드 i 에 대한 n 개 변수들의 동작 정도를 나타내며 요소들의 작은 모드에 대하여 상태변수들의 위상차를 나타낸다. 또한, 좌고유벡터 w_i 는 i 번째 모드에 나타난 원래 상태변수의 조합을 표시한다. 따라서, 우고유벡터 v_i 의 k 번째 요소는 i 번째 모드에 관한 변수 x_k 의 동작을 의미한다. 반면에 좌고유벡터 w_i 의 k 번째 요소는 i 번째 모드에 대한 이들 동작의 기여도 혹은 참여도를 의미한다. 상태변수와 모드들 간의 관계를 파악하는데 있어 좌/우 유벡터를 각기 사용하는 것은 이들 고유벡터들의 요소들이 상태변수의 단위와 크기에 좌우된다는 문제가 있다. 이를 해결하기 위하여 기여율 행렬 P 를 사용하는데 이는 다음과 같이 조합하여 상태변수와 모드들간의 관련성을 판별하는데 그 목적이 있다.[2]

$$P = [p_1, p_2, \dots, p_n] \quad (19)$$

여기서,

$$P_i = \begin{bmatrix} p_{i1} \\ p_{i2} \\ \dots \\ p_{in} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{i1} \cdot w_{i1} \\ v_{i2} \cdot w_{i2} \\ \dots \\ v_{in} \cdot w_{in} \end{bmatrix} \quad (20)$$

참여율(기여율) p_{ki} 는 식(21)과 같이 정의되며, 다음과 같은 성질들을 갖게 된다.

$$p_{ki} = v_{ki} \times w_{ik} \quad (21)$$

- i 번째 모드에 대한 k 번째 상태변수의 상대적인 참여 정도
- v_{ki} 는 i 모드에 대한 x_k 의 동작을 표시
- w_{ik} 는 그 모드에 대한 이들 동작의 기여
- p_{ki} 는 순 참여도를 표시. Dimension이 없음
- 고유벡터를 정규화 할 경우,

$$\text{모드들과 관련된 기여율의 합} \quad \sum_{i=1}^n p_{ki} = 1$$

$$\text{모든 상태변수들과 관련된 기여율의 합} \quad \sum_{i=1}^n p_{ki} = 1$$

또한, 참여율 p_{ki} 는 상태행렬 A 의 대각요소인 a_{kk} 에 대한 고유치 λ_i 의 감도와 같다는 것을 알 수 있다.

$$p_{ki} = \frac{\partial \lambda_i}{\partial a_{kk}} \quad (22)$$

참여율은 특히 어떠한 모드에 가장 큰 영향을 주는 상태변수를 규명하는데 유용하며 특히 Dimension이 없으므로, 어떤 모드에 관련된 상태변수가 하나 이상일 경우, 이들의 영향을 서로 비교할 때에는, 우고유벡터로는 곤란한 문제들을 용이하게 해결할 수 있는 장점이 있다.

2.3 SPF(Speed Participation Factor)법

참여율(PF)은 상태행렬의 대각요소의 변화에 대한 고유치의 감도를 나타내므로(식22) 상태변수에 대응하는 발전기의 Local feedback에 대한 고유치의 감도를 얻는다. 따라서, 각 발전기의 속도에 해당하는 j 번째 상태변수 x_j 를 사용한 i 번째 모드에 대한 PF를 SPF_{ji} 라 정의하면 SPF는 각 발전기의 계동특성 D_j 가 변화할 때의 i 번째 고유값의 감도가 된다. SPF_{ji} 중에서 크기가 가장 큰 발전기에 PSS를 설치하는 것이 i 번째 모드의 계동특성을 개선할 수 있다. 그러므로, 다음 절에서는 이 SPF를 이용하여 대규모 한전계통에서의 PSS 설치지점을 선정하도록 한다.

3. 한전계통의 PSS 최적 설치 발전기 선정

3.1 SPF를 이용한 PSS 설치 후보지 선정

본 절에서는 EPRI의 SSSP(Small Signal Stability Program) 프로그램을 이용하여 2000년도 피크치 한전계통의 고유치 해석을 수행하였다. 표 1은 특정 주파수 범위의(0.6~1.4Hz) 모드들을 검색(Frequency Scan)하여 모드별로 속도 참여율 (Speed Participation Factor)이 높은 발전기를 표시하고 모드형태를 분석하였다. 또한, 발전기 자신의 안정도를 개선하는 관점에서 지역모드 동요를 중심으로 PSS 위치결정을 위한 중요동요 모드를 선정하였으며(표 2) 이 중 비교적 안정도 여유가 적은 -0.4959+j8.1670 모드에 대한 속도 참여율에 대한 결과를 나타내었다.(표 3)

표 1. 고유치 해석결과 (SSSP)

| Mode No. | 고유치 (Eigenvalue) | | 주파수 | 댐핑율 | SPF가 우월한 발전기 (모드형태) |
|----------|------------------|--------|--------|--------|-----------------------|
| | real | image | | | |
| 1 | -0.0539 | 4.3082 | 0.6657 | 0.0125 | 고리(광역모드) |
| 2 | -0.0974 | 5.4426 | 0.8862 | 0.0179 | 울진(지역모드) |
| 6 | -0.2473 | 7.0569 | 1.1231 | 0.0350 | 월성1-4, 영광, 고리(광역모드) |
| 12 | -0.3744 | 8.2896 | 1.3193 | 0.0451 | 월성#1(지역모드) |
| 11 | -0.4874 | 8.2201 | 1.3083 | 0.0592 | 청평 1G, 2G (발전기간 동요모드) |
| 10 | -0.4959 | 8.1670 | 1.2998 | 0.0607 | 청평1G, 2G (지역모드) |
| 4 | -0.4390 | 6.8031 | 1.0828 | 0.0644 | 고리(지역모드) |
| 3 | -0.4373 | 6.2371 | 0.9927 | 0.0699 | 서인천(지역모드) |
| 13 | -0.5901 | 8.2921 | 1.3197 | 0.0710 | 울진#3(지역모드) |
| 14 | -0.5959 | 8.3122 | 1.3229 | 0.0715 | 울진#4(지역모드) |
| 8 | -0.5882 | 7.5763 | 1.2058 | 0.0774 | 무주2G, 1G(지역모드) |
| 15 | -0.7168 | 8.7669 | 1.3953 | 0.0815 | 분당(지역모드) |
| 7 | -0.6139 | 7.2402 | 1.1523 | 0.0845 | 고리 G1(지역모드) |
| 9 | -0.6642 | 7.6607 | 1.2192 | 0.0864 | 평택 4-1GT(지역모드) |
| 5 | -0.6517 | 6.8669 | 1.0929 | 0.0945 | 보령(지역모드) |

표 3은 무주양수발전소 1, 2호기에 PSS를 설치하면 -0.4959 + j 8.1670 모드에 가장 큰 댐핑 토오크를 제공할 수 있음을 나타낸다.

표 2. PSS 설치 위치 결정을 위한 중요 동요모드

| Mode No. | 고유치 (Eigenvalue) | | 주파수 | 댐핑율 | SPF가 우월한 발전기 (모드형태) |
|----------|------------------|--------|--------|--------|----------------------|
| | real | image | | | |
| 6 | -0.2473 | 7.0569 | 1.1231 | 0.0350 | 월성1-4, 영광, 고리 (광역모드) |
| 8 | -0.5882 | 7.5763 | 1.2058 | 0.0774 | 무주2G, 1G(지역모드) |
| 10 | -0.4959 | 8.1670 | 1.2908 | 0.0607 | 청평1G, 2G (지역모드) |
| 12 | -0.3744 | 8.2866 | 1.1393 | 0.0451 | 월성#1(지역모드) |

표 3. -0.4959+j8.1670 모드에 대한 속도 참여율

| BUS# | STATION | MAG. | PHASE | BUS# | STATION | MAG. | PHASE |
|-------|---------|-------|--------|-------|---------|-------|-------|
| 26252 | 무주-#2G | 1 | 7.5 | 26252 | 울산-#6G | 0.005 | 113 |
| 26251 | 무주-#1G | 1 | 7.5 | 29364 | 울산GT#8 | 0.005 | 53.1 |
| 29152 | 고리-#2G | 0.25 | -120.2 | 29363 | 울산GT#7 | 0.005 | 53.1 |
| 27154 | 영광#4 | 0.036 | -6.3 | 28151 | 월성#1 | 0.004 | 51 |
| 27153 | 영광-#3G | 0.033 | -4.6 | 29365 | 울산ST#3 | 0.004 | 27.1 |
| 27152 | 영광-#2G | 0.023 | 0 | 29366 | 울산ST#4 | 0.004 | 28.4 |
| 27151 | 영광-#1G | 0.021 | -1.3 | 27252 | 여주-#2G | 0.004 | -5.5 |
| 29151 | 고리-#1G | 0.01 | -36.1 | 29362 | 울산GT#6 | 0.003 | 56.4 |
| 29251 | 고리-#3G | 0.01 | -154.7 | 29361 | 울산GT#5 | 0.003 | 56.4 |
| 29252 | 고리-#4G | 0.01 | -154.7 | 30372 | 남강#2 | 0.003 | 113.9 |
| 27251 | 여주-#1G | 0.008 | 1.5 | 30371 | 남강-#1G | 0.003 | 113.9 |
| 28154 | 월성#4 | 0.006 | 57.9 | 30154 | 삼천포#4 | 0.002 | -53.3 |
| 28153 | 월성#3 | 0.006 | 57.9 | 30153 | 삼천포#3 | 0.002 | -53.3 |
| 28152 | 월성#2 | 0.006 | 57.9 | 30152 | 삼천포#2 | 0.002 | -51.7 |
| 27752 | 하동#2 | 0.006 | -14.2 | 30151 | 삼천포#1 | 0.002 | -51.7 |
| 27751 | 하동#1 | 0.006 | -14.2 | 30155 | 삼천포#5 | 0.002 | -54.5 |
| 27272 | 호남-#2G | 0.006 | 4.5 | 30156 | 삼천포#6 | 0.002 | -62.3 |
| 27271 | 호남-#1G | 0.006 | 4.5 | 24525 | 분당#5GT | 0.001 | 40.4 |
| 27754 | 하동#4 | 0.006 | -15 | 24524 | 분당#4GT | 0.001 | 40.4 |
| 27753 | 하동#3 | 0.006 | -15 | 24523 | 분당#3GT | 0.001 | 40.4 |
| 29351 | 울산-#4G | 0.005 | 112.6 | 24522 | 분당#2GT | 0.001 | 40.4 |
| 29353 | 울산-#6G | 0.005 | 113 | 24521 | 분당#1GT | 0.001 | 40.4 |

3.2 실무적인 사항을 고려한 PSS 설치 최종 발전기 선정

본 절에서는 한전계통의 고유치 해석 결과에 의한 설치 후보지 중 실무적인 여러 가지 사항이 고려된 PSS 설치 발전기를 최종적으로 선정하고자 한다. 고려사항으로는 먼저, 고유치 해석 결과에 기초하여 광역모드 이외의 지역모드 동요를 중심으로 댐핑률이 비교적 나쁜 발전기와 PSS설치 전후의 계통 미소신호 안정도 효과가 큰 발전기를 선정하였으며, 설치할 디지털 PSS의 성능시험 가능여부 등, 설치할 PSS가 시제품임을 감안하여 원자력과 같이 기저부하용으로 투입되는 위험부담이 큰 발전기를 제외하였다. 또한, 이미 PSS가 설치된 발전기(고리, 울진, 월성, 서인천 등)와 수력과 같이 용량이 적어 PSS 설치 효과가 미흡한 발전기도 역시 제외시켰다. 그 결과, PSS가 설치되어 있지 않으며, 발전소 용량이 적정(300MW)하고 설치기수가 동일(2기)한 '무주양수발전소(1,2호기)'를 최종 설치 발전기로 선정하였다.

3.3 PSS 설치효과 해석

본 절에서는 무주양수발전소에서의 PSS 설치효과를 해석하기 위해 일반적인 정수값을 갖는 PSS를 모델링하고 시뮬레이션하였다.

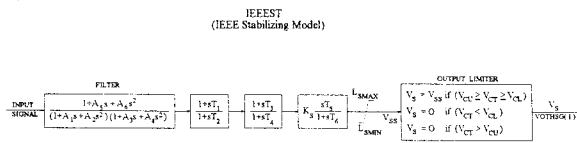


그림 1. PSS IEEE ST 모델

그림 1은 시뮬레이션에 사용된 PSS 모델이며, 표 4는 이 모델의 정수 값이다. 시뮬레이션을 위하여 따로 PSS를 튜닝하는 작업은 거치지 않았으나, 만약 각 발전소의 특성에 따라 PSS 값을 정밀히 튜닝한다면 본 절에서의 용동보다 더 나은 결과를 얻을 수 있을 것이다. 그림 2는 무주양수발전소와 청평양수, 월성원자력발전소의 상정사고시의 전력동요를 보여준다. 상정사고는 신옥천 6600 모선에 0.025초 동안 3상 단락사고를 낸 후 제거하였다. 무주양수발전소의 동요모드는 지역모드로서 PSS가 있는 경우와 없는 경우를 비교할 때 그 차이는 확연하다.(그림 3) PSS가 없는 경우,

동요가 지속적으로 나타나고 있으나 PSS를 설치한 후, 이러한 동요가 줄어들게 된다. 이와 같이 지역모드는 해당되는 발전기에 PSS를 설치하면 그 효과가 바로 나타남을 알 수 있다. 사용된 PSS는 초기에 나타나는 지역모드 동요를 잘 댐핑하고 있고, 시간이 지남에 따라 나타나는 광역모드에 대해서도 약간의 댐핑을 해 주고 있다.

표 4. IEEE ST 모델의 정수값

| 정수 | 정수 값 | 정수 | 정수 값 |
|----|--------|-------|-------|
| A1 | 35/570 | T4 | 0.025 |
| A2 | 1/570 | T5 | 10.0 |
| A3 | 0.0 | T6 | 10.0 |
| A4 | 0.0 | KS | 15.0 |
| A5 | 0.0 | Lsmax | 0.15 |
| A6 | 0.0 | Lsmin | -0.15 |
| T1 | 0.25 | | |
| T2 | 0.025 | | |
| T3 | 0.25 | | |

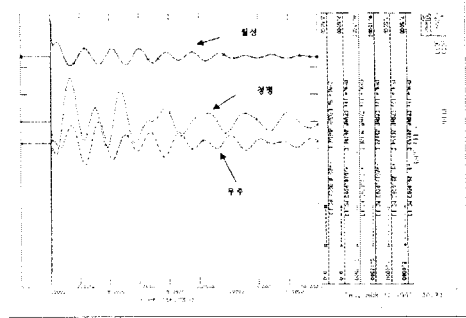


그림 2. 0.025초 3상 단락사고(신옥천 345kV) 후 제거

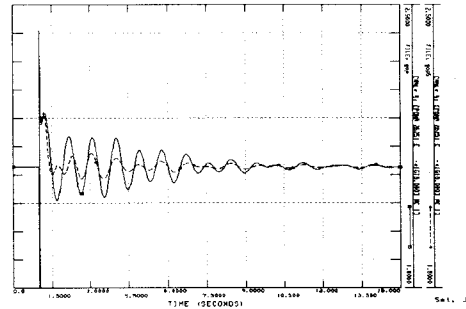


그림 3. PSS 설치효과-무주양수 (점선 : With PSS, 실선: Without PSS)

4. 결론

본 논문에서는 현재 한전에서 수행중인 디지털 PSS 개발연구와 관련하여 개발될 PSS를 설치할 최적 발전기 위치 선정을 위해 2000년 한전계통 피크치 데이터를 이용한 고유치 해석을 수행하였다. 본 해석에서는 발전기 속도에 해당되는 고유치 감도지수인 SPF를 이용하여 PSS 설치 후보지를 선정하고 설치 실무적인 고려사항을 반영하여 설치 발전소를 무주양수 발전소로 최종 선정하였다. 미소신호 안정도에서의 동요문제는 광역모드가 더 심각하지만 이 광역모드에 대한 댐핑을 위해서는 관련된 다수의 발전기에 PSS를 설치할 필요가 있으므로, 본 논문에서는 일단 지역모드의 댐핑만 고려해서 선정하기로 하고, 광역모드의 댐핑은 차후 기 설치 PSS의 파라미터 튜닝방안과 함께 생각하기로 한다.

[참고 문헌]

- [1] 김태근, 신정훈의 "발전기 제어계통 안정화장치(PSS) 개발연구" 중간보고서, TM.97EJ05.1999.02, 1999
- [2] P. Kundor, "Power System Stability and Control", McGraw-Hill, 1994
- [3] P.Kundur와, "Application of PSS's for Enhancement of Overall System Stability", IEEE Trans., Vol. 4, No2, 1989