

초전도 에너지 저장장치를 이용한 준동기공진 의 개선에 관한 연구

이 승 원
서울대학교 전기공학과

원 영 진
서울대학교 전기공학과

A Study on The Improvement of Subsynchronous Resonance Using
by Superconducting Magnet Energy Storage.

Lee, Seung won
Seoul National Univ.

Won, Young Jin
Seoul National Univ.

Abstract

The investigation of subsynchronous resonance by utilities has resulted in proposed and applied method to mitigate or eliminate SSR damage to turbine generators. Many papers presented various methods and devices that can be used as countermeasures for the SSR. This paper introduced the availability of Superconducting magnet energy storage as a countermeasure for the SSR in the capacitor compensated transmission line.

1. 서론

최근의 전력수요 증가와 사회환경적인 여러 장애요인들은 대단위 용량급의 발전설비를 부하중심지에서 멀리 떨어진 곳에 위치도록 하였으며 이에따라 송전용량의 증가를 초래하였다.

그러나 첩단부지 선정의 어려움, 소용량 송전설비의 다수화에 따른 건설비의 증가 및 전압관리의 문제등은 단위회선당 송전용량의 증대를 요구하여 직렬콘덴서 보상방식과 같은 대책이 연구되었으며, 회선종가역제와 송전선 건설비용의 감소를 도모하였다. 직렬콘덴서 보상방식은 송전선에 콘덴서를 직렬로 연결하여 송전선의 전 리액턴스 성분을 감소시켜 결과적으로 송전용량의 증가를 유도하는 방식이다. 이 방식은 송전계통의 보상비 (X_c/X_L) 가 증가하면 발전기, 변압기, 송전선등의 유도성임피던스 요소와 콘덴서의 용량성임피던스와의 직렬공진에 의해 시스템의 상용주파수보다 약간 높거나 낮은 주파수의 공진이 발생하는 경우가 생긴다. 이 현상은 발전기의 기계적 요소와 결합하여 발전기의 추에 손상을 주는 결과를 초래하기도 한다.

본 논문에서는 이러한 준동기공진의 해소책으로 초전도 전력에너지 저장장치를 사용할 수 있

음을 보였다. 초전도 전력에너지 저장장치는 높은 효율로 전력에너지를 저장할 수 있을 뿐만 아니라, 그 효율성을 이용하여 전력계통 안정화 장치로서의 기능도 이미 입증되었다.

본 논문에서는 초전도 전력에너지 저장장치 의 유도부조전력제어를 출력전류의 d축 및 q축 성분 제어로 변경하였으며 이를 이용하여 직렬콘덴서 보상 송전계통의 준동기공진을 억제할 수 있음을 고유치 계산을 통하여 나타내었다.

2. 준동기공진의 원인

준동기공진은 전기회로와 먹어빈발전기간에 시스템의 동기주파수보다 조금 낮은 주파수로 에너지의 교환이 일어나는 전력계통의 상태를 지칭한다. 이 때의 공진주파수(F_{er})는

$$F_{er} = F_0 \times \sqrt{X_c/X_L} \quad (1.1)$$

으로 표시된다.

전기계에서 공진주파수 때의 전류는 주파수 F_r 을 갖는 회전자와 전류증가를 가져온다. 이에 따라 병행 상상 전기자 전류는 동기기 내에 회전자계를 발생시키게된다. 전기자권선 상전류의 시간적 분포와 공간적 분포는 전기과주파수 F_{er} 을 갖는 회전자계를 발생하며 이 회전자계에 의해 유기된 회전자전류는 전기자자계와 회전자자계의 상대속도의 차에 지배받는다. 결국 회전자주파수는 고정자전류의 정상분 예외해 $F_r = F_0 - F_{er}$, 역상분 예외해 $F_r = F_0 + F_{er}$ 의 주파수를 갖게된다. 이 때 정상분 예외한 요소를 준동기공진이라 하고, 역상분 예외한 요소를 과동기공진이라 한다. 준동기공진에는 다음의 3가지 현상이 있다.

일반적으로 유도전동기가 동기속도 이상으로 회전하게 되면 슬립(S)는 '0'보다 작아져서, 전동기 단자측에서 본 회전자회 동기회전(R/S)은 부상이 되어 계통에 전력을 전송한다는 것은 잘못된 사실이다. 동기기의 경우에도, 동기속도에서

회전마다 전기자 단자에 준동기전류가 나뉘면 유도발전기와 비슷한 행동을 한다.

준동기 주파수에서의 동기 임피던스는 회전자 저항과 부상슬립에 의한 부상저항 요소를 포함하게 되는데, 준동기 주파수가 동기 주파수로 근접하면 슬립률 부상슬립은 더욱 작아지고 부상저항은 커지게 된다. 동기기가 R-L-C 회로로 무한 모션에 연결되어 있는 경우, 공진주파수 때의 발전기 부상저항의 값이 회로저항 보다 크게 되면 회로는 자기여자 된다. 이는 계통안정도와 밀접한 연관을 갖는다.

과도 모오르는 전기회로의 과도전류에 의한 전기적 모오르가 회전자의 비틀림 공진주파수 중의 하나와 같아질때 일어난다. 이 현상이 발생하면 축의 모오르는 급격히 증가된다. 즉 준동기 과도전류의 크기가 어느 정도 되고 주파수가 비틀림 공진의 주파수와 같아지면, 비단 차단기에 의한 차단이 행해진다 하여도 축의 수명이 무리가 큰 정도의 균(Crack)이 생길수가 있다. 결국 콘덴서 보상 슬립 계통에서는 이 준동기 전류를 효과적으로 제어하여 비틀림 공진 주파수를 억제하는 것이 매우 중요한 과제로 대두되고 있다.

비틀림 상호작용(Torsional Interaction)은 전기자회로와 회전자의 Spring-mass 시스템과의 상호작용에 의해 발생하는 자기여자의 한 형태이다.

회전자가 평균 동기속도에 대하여 각각 $\Delta\theta_0 \sin nct$ 정도로 진동하고 있으면 공극자속 맥에서 $\Delta\phi_0$ 에는 ω 축 변화가 있게 된다.

이 자속의 변동량 $\Delta\phi$ 는 $\omega \Delta\theta_0 \sin nct$ 이며 이때 발생하는 변동이 일어난 동기속도의 공극자속이다. 이 자속 맥에서의 변동은 두개의 상반회전 자속 맥에서도 나타낼수 있으며 각각의 크기는 $\Delta\phi$ 의 반값 ($\Delta\theta_0/2$) 이 되고 회전속도는 $(\omega + m)$ 과 $(\omega - m)$ 이 된다.

준동기 공진에 의한 유도전압을 $\Delta\omega_0$ 만의 값으로 표현하면 다음과 같이 된다.

$$E_{sub} = \left(\frac{\omega_0 - m}{2m} \right) \cdot \frac{\Delta\omega_0}{\omega_0} \quad (2.1)$$

식(2.1)은 비록 작은 값이지만 작은 임피던스 때문에 매우 큰 전류를 흘리게 된다. 이 전류에 의하여 회전자 공진주파수의 전기적 진동 모오르가 발생되며 이 모오르가 속도편차와 반대방향으로 작용하여 기계계의 재동모오르보다 큰 값이 되면 비틀림 진동은 심화되어 결국은 자기여자 상태가 되어서 계통 불안정의 한 원인이 된다.

3. 선형화 상태 방정식의 구성

3.1 전기계 상태 방정식의 구성

3.1.1 초전도 전력에너지 저장 장치

초전도 전력에너지 저장장치는 (SMES) 상상

double bridge 전력변환기 2대를 직렬로 연결하여 대역제어를 행할 경우 계통에서 요구되는 유도 무효전력을 동시에 제어할 수 있음이 이미 입증되었다.

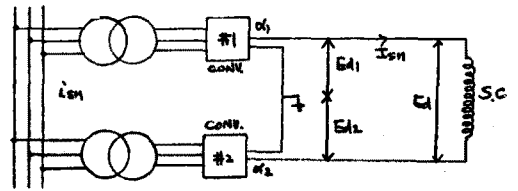


그림 3.1 초전도 전력에너지 장치의 구성

그림 3.1에서 변압기의 누설 리액턴스를 무시할 경우

$$E_{d1} = E_{d0} \cos \alpha_1 \quad (3.1)$$

$$E_{d2} = E_{d0} \cos \alpha_2 \quad (3.2)$$

그러므로

$$E_d = E_{d1} + E_{d2} = E_{d0} (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2) \quad (3.3)$$

유효전력과 무효전력은

$$P_{sn} = P_1 + P_2 = I_{sn} E_{d0} (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2) \quad (3.4)$$

$$Q_{sn} = Q_1 + Q_2 = I_{sn} E_{d0} (\sin \alpha_1 + \sin \alpha_2)$$

이제 초전도 전력에너지 저장장치에 의해 모션에 흐르는 전류를 I_{sn} 이라하고 이를 d-g 변환하기 위하여 모션의 전압을 V_g 로 하면

$$-(P_{sn} + Q_{sn}) = V_g \cdot I_{sn}^* \\ = (V_g \sin \beta + j V_g \cos \beta) (I_{sn} d - j I_{sn} g) \quad (3.5)$$

식 (3.4) 과 식 (3.5) 을 같게 놓으면

$$I_{sn} \cdot \frac{V_g}{\omega} \cdot (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2) = V_g (\sin \beta I_{sn} d + \cos \beta I_{sn} g)$$

$$I_{sn} \cdot \frac{V_g}{\omega} (\sin \alpha_1 + \sin \alpha_2) = V_g (\cos \beta I_{sn} d + \sin \beta I_{sn} g) \quad (3.6)$$

그러므로 $I_{sn} d - I_{sn} g$ 동시제어 가능 영역은

$$I_{sn}^2 d^2 + I_{sn}^2 g^2 = I_{sn}^2 \cos^2 \left(\frac{\alpha_1 - \alpha_2}{2} \right) \quad (3.7)$$

3.1.2 전기계 과 요소의 모델링

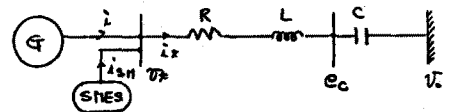


그림 3.2 전기계 모델

동기기는 여자전선만 d축에 설치하는 것으로 하여 Park's 3차 모델을 사용한다.

이때 발전기의 선형화 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{1}{\omega_b} (-X_d \Delta i_d + X_{md} \Delta i_f) \\ = -X_g \Delta i_g + \psi_g \Delta \omega + r_a \Delta i_d + \Delta V_g$$

$$\frac{1}{\omega_b} (-X_g \Delta i_g) \\ = -(-X_d \Delta i_d + X_{md} \Delta i_f) - \psi_{d0} \Delta \omega + r_a \Delta i_g \\ + \Delta V_g$$

$$\frac{1}{\omega_b} (-X_{md} \Delta i_d + X_{fd} \Delta i_f) = -r_f \Delta i_f + \Delta V_f \quad (3.8)$$

발전기 모선에서 송전선으로 흐르는 전류를 $d-q$ 성분으로 분해하여 송전계통의 전류, 전압방정식을 세우면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \Delta i_d + \Delta i_{sm} \\ \Delta i_q + \Delta i_{sq} \end{bmatrix} = \frac{K_s}{\omega_p} \begin{bmatrix} \Delta e_{cd} \\ \Delta e_{cq} \end{bmatrix} + \frac{1}{X_c} \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta e_{cd} \\ \Delta e_{cq} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta v_{fd} \\ \Delta v_{fq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & -X \\ X & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_d + \Delta i_{sm} \\ \Delta i_q + \Delta i_{sq} \end{bmatrix} + \frac{K_s}{\omega_p} \begin{bmatrix} \Delta i_d + \Delta i_{sm} \\ \Delta i_q + \Delta i_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta e_{cd} \\ \Delta e_{cq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta v_{fd} \\ \Delta v_{fq} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

여자계통의 선형 상태 방정식은 다음과 같다.

$$(\Delta v_{fd} - \frac{K_{s3}}{1+S_{Tc}} \Delta E_{fd}) \cdot \frac{K_{s1}}{1+S_{Tc}} = \Delta v_{fd} \quad (3.11)$$

$$\Delta v_{fd} \cdot \frac{1}{1+S_{Tc}} = \Delta E_{fd} \quad (3.12)$$

초전도 전력에너지 저장장치는 1차 지연 요소로 모델링 하면 다음과 같다.

$$\Delta i_{sm} \cdot \frac{1}{1+S_{Tc}} = \Delta i_{sm} \quad (3.13)$$

$$\Delta i_{sq} \cdot \frac{1}{1+S_{Tc}} = \Delta i_{sq} \quad (3.13)$$

3.1.3 기계계와 모델링

시스템 해석을 위한 기계계는 6 mass-spring 시스템으로 생략하여 순간적인 기계적 모오크 (Tm)의 변화는 없다고 가정한다 또한 일반적으로 여자기의 모오크는 다른 모오크에 비하여 매우 작은 값을 가지므로 무시한다.

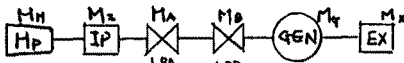


그림 3.3 선형 터빈-발전기 시스템

그림 3.3 터빈-발전기 시스템의 선형 모오크 동형식은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \Delta \dot{\omega}_m &= \frac{1}{M_H} [\Delta T_m - D_H \Delta \omega_m - K_{H1}(\Delta \theta_m - \Delta \theta_1)] \\ \Delta \dot{\theta}_m &= \omega_m \Delta \omega_m \\ \Delta \dot{\omega}_1 &= \frac{1}{M_1} [\Delta T_1 - D_1 \Delta \omega_1 + K_{H1}(\Delta \theta_m - \Delta \theta_1) - K_{1A}(\Delta \theta_1 - \Delta \theta_A)] \\ \Delta \dot{\theta}_1 &= \omega_1 \Delta \omega_1 \\ \Delta \dot{\omega}_A &= \frac{1}{M_A} [\Delta T_A - D_A \Delta \omega_A + K_{1A}(\Delta \theta_1 - \Delta \theta_A) - K_{AB}(\Delta \theta_A - \Delta \theta_B)] \\ \Delta \dot{\theta}_A &= \omega_A \Delta \omega_A \\ \Delta \dot{\omega}_B &= \frac{1}{M_B} [\Delta T_B - D_B \Delta \omega_B + K_{AB}(\Delta \theta_A - \Delta \theta_B) - K_{BG}(\Delta \theta_B - \Delta \delta)] \\ \Delta \dot{\theta}_B &= \omega_B \Delta \omega_B \\ \Delta \dot{\omega}_G &= \frac{1}{M_G} [-\Delta T_G - D_G \Delta \omega + K_{BG}(\Delta \theta_B - \Delta \delta) - K_{GX}(\Delta \delta - \Delta \theta_X)] \\ \Delta \dot{\theta}_G &= \omega_G \Delta \omega \\ \Delta \dot{\omega}_X &= \frac{1}{M_X} [-\Delta T_X - D_X \Delta \omega_X + K_{GX}(\Delta \delta - \Delta \theta_X)] \\ \Delta \dot{\theta}_X &= \omega_X \Delta \omega_X \end{aligned} \quad \dots \dots (3.14)$$

식(3.14)에서 ΔT_c 는 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta T_c = -(\Delta i_d - \Delta i_{sm}) i_{q0} \Delta i_d + [K_{md} i_{f0} - (\Delta i_d - \Delta i_{sm}) i_{d0}] \cdot \Delta i_{sq} + K_{md} i_{q0} \Delta i_f \quad (3.15)$$

3.2 선형 상태방정식의 구성

이제까지 구성된 개개의 선형 방정식을 다음과 같이 상태변수법으로 표시한다.

$$\dot{X} = [A]X + [B]U \quad (3.16)$$

식(3.16)를 기계계와 전기계로 분할하면

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_M \\ \dot{X}_E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{MM} & A_{ME} \\ A_{EM} & A_{EE} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_M \\ X_E \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ D \end{bmatrix} U \quad (3.17)$$

이때 [U]는 다음과 같다.

$$[U]^T = [\Delta i_{sm} \quad \Delta i_{sq} \quad \Delta v_{fd} \quad \Delta v_{fq}] \quad (3.18)$$

식(3.17)의 기계계 상태 변수는

$$[X_M]^T = [\Delta \omega_m, \Delta \theta_m, \Delta \omega_1, \Delta \theta_1, \Delta \omega_A, \Delta \theta_A, \Delta \omega_B, \Delta \theta_B, \Delta \omega, \Delta \delta, \Delta \omega_X, \Delta \theta_X] \quad (3.19)$$

전기계 상태 변수는

$$[X_E]^T = [\Delta i_{sm}, \Delta i_{sq}, \Delta i_d, \Delta i_q, \Delta i_f, \Delta e_{cd}, \Delta e_{cq}, \Delta v_{fd}, \Delta v_{fq}, \Delta E_{fd}] \quad (3.20)$$

3.3 시스템 해석

3.2에서 구축한 시스템의 해석을 위하여

Singular Perturbation method 를 적용한다.

즉 3.2의 시스템을 각각의 응답 속도에 따라 3개의 그룹으로 분류한다. 이 세 그룹은 응답이 제일 낮은 계자연선 회로모드, 그 다음으로 낮은 전력동요 모드와 다른 것에 비하여 빠른 모드로 구분되며 이중, 계자연선 회로는 무시하며 이에 따라 AVR의 상태변수로 함께 무시된다.

시스템을 응답이 빠른 모드와 낮은 모드로 분할하면,

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_{r1} \\ \dot{X}_{r2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{r11} & A_{r12} \\ A_{r21} & A_{r22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{r1} \\ X_{r2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{r1} \\ B_{r2} \end{bmatrix} U \quad (3.21)$$

단, $[X_{r1}]^T = [\Delta \omega, \Delta \delta]$

식(3.21)의 Slow-subsystem 은

$$\dot{X}_{rs} = [A_{r11} - A_{r12} \cdot A_{r22}^{-1} \cdot A_{r21}] X_{r1} + [B_{r1} - A_{r12} \cdot A_{r22}^{-1} \cdot B_{r2}] U_s \quad (3.22)$$

Fast-subsystem 은

$$u [\dot{X}_r - X_{rs}] = [A_{r22}] [X_r - X_{rs}] + [B_{r2}] [U - U_s] \quad (3.23)$$

3.4 초전도 전력에너지 저장장치 제어계의 설계

3.4.1 Slow-subsystem 제어계

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\omega} \\ \Delta \dot{\delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{s11} & a_{s12} \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \omega \\ \Delta \delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{s11} & b_{s12} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_{sm} \Delta i_{sq} \\ \Delta v_{fd} \Delta v_{fq} \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

다음과 같은 상태 Feed back 을 생략하면,

$$\begin{bmatrix} \Delta i_{sm} \Delta i_{sq} \\ \Delta v_{fd} \Delta v_{fq} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} k_{s11} & k_{s12} \\ k_{s21} & k_{s22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \omega \\ \Delta \delta \end{bmatrix} = -K_s \begin{bmatrix} \Delta \omega \\ \Delta \delta \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

Ks행렬은 다음과 같이 된다.

$$K_s = \begin{bmatrix} -2\alpha\sigma b_{s11} & h b_{s11} \\ -2\alpha\sigma b_{s12} & h b_{s12} \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

3.4.2 Fast-subsystem 외 제어계

이 시스템에서는 2차원상의 평가함수를 최소로 하는 최적 제어계를 설계한다. 평가함수를

$$J_5 = \int_0^{\infty} (X_5^T W_x X_5 + U_5^T W_u U_5) \quad (3.27)$$

이 J_5 를 최소로 하는 최적 제어는

$$U_5 = \begin{bmatrix} \Delta i_{SHd05} \\ \Delta i_{SHj5} \end{bmatrix} = -K_5 X_5 = -W_u^{-1} B_{r2}^T H X_5 \quad (3.28)$$

여기서 $[H]$ 는 다음 리카지 방정식의 해이다.

$$H A_{r22} + A_{r22}^T H - H B_{r2} W_u^{-1} B_{r2}^T H + W_x = 0 \quad (3.29)$$

4. 고유치 계산 결과

고유치 계산 결과는 다음 표에서 보듯이 초전도 전력에너지 저장장치 사용시 안정모드가 됨을 알 수 있었다.

표1. 제어없을 때의 고유치	표2. SMES 제어 때의 고유치
- .1818 + j 298.1800	- .1817 + j 298.1800
- .1818 - j 298.1800	- .1817 - j 298.1800
+ .1544 + j 204.0012	- .4879 + j 202.6578
+ .1544 - j 204.0012	- .4879 - j 202.6578
- .2501 + j 161.9801	- .2567 + j 180.6524
- .2501 - j 161.9801	- .2567 - j 180.6524
- .6707 + j 127.0311	- .7254 + j 142.2567
- .6707 - j 127.0311	- .7254 - j 142.2567
- .2827 + j 99.2154	- .3215 + j 100.2536
- .2827 - j 99.2154	- .3215 - j 100.2536
- .0479 + j 8.4801	- .1987 + j 11.0845
- .0479 - j 8.4801	- .1987 - j 11.0845
- 6.198 + j 209.4017	- 6.200 + j 211.4284
- 6.198 - j 209.4017	- 6.200 - j 211.4284
- 7.022 + j 542.8034	- 8.210 + j 550.6829
- 7.022 - j 542.8034	- 8.210 - j 550.6829
- 8.400 + j 000.0000	- 12.35 + j 253.0627
- 8.400 - j 000.0000	- 12.35 - j 253.0627
- 101.1 + j 000.0000	- 625.0 + j 000.0000
- 500.0 + j 000.0000	- 4.783 + j 0.8535
	- 4.783 - j 0.8535

5. 결 론

본 논문을 통하여 직렬 콘덴서 보상 송전계통에 초전도 전력에너지 저장장치를 설치할 경우 준동기공진 현상이 효과적으로 개선됨과 동시에 전력동요의 불안정현상도 개선됨을 알 수 있었으며, 초전도 전력에너지 저장장치의 용, 무효 전력제어를 d-영 동시제어로 바꿀수 있는 방법을 제시하였다. 이후 전력계통의 안정화 장치로서의 초전도 전력에너지 저장장치의 사용을 기대할 수 있을 터라 생각한다.

참 고 문 헌

1. 서울대학교, 한전 기술연구원, "초전도 전력에너지 저장장치에 관한 연구" (1986. 8)
2. 서울대학교, 한전 기술연구원, "초전도 전력에너지 저장장치에 관한 연구" (1987. 12)
3. Y.N.Yu, "electric power System Dynamics", Academic Press, 1982
4. Mahmoud, etc, "Large Scale Control Systems", Marcel Dekker Inc., 1985
5. P.s.Bibbhar, "Generalised Circuit Theory of Electrical Machines", Khanna Publishers, 1975
6. Y.N.Yu & A.Yan, "Multimode Stabilization of Torsional Oscillations Using Output Feedback", IEEE Trans. Vol. PAS-101 (1982)
7. IEEE Commite Report, "First Supplement to a Bibliography for Study of SSR", IEEE Trans. Vol. PAS-98 (1979, 11/12)
8. IEEE Commite Report, "Proposed Terms and Definitions of SSR", IEEE Trans. Vol. PAS-99 (1980, 4)
9. IEEE Commite Report, "countermeasures to SSR", IEEE Trans. Vol. PAS-99 (1980, 9/10)
10. 조 병욱, 서울대학교 대학원, 석사학위 논문 (1985)
11. 이 영수, 서울대학교 대학원, 석사학위 논문 (1987)
12. 이 영수, "고유치 제어에 의한 전력계통의 안정화",