한국지능시스템학회 논문지 2010, Vol. 20, No. 2, pp. 220-225

전력 품질 개선을 위한 STATCOM 시스템의 강인 안정도 해석

Robust Stability Analysis of STATCOM System for Power Quality Enhancement

성화창* · 박진배* · 탁명환 · 주영훈**+

Hwa Chang Sung, Jin Bae Park, Myung Hwan Tak and Young Hoon Joo

* 연세대학교 전기전자공학과

** 군산대학교 제어로봇시스템공학과

요 약

본 논문에서는 전력 품질 개선 및 전력 계통 신뢰도 향상을 위한 방안으로서 STATCOM 발전 시스템의 시스템 모델링 및 강인 안정성에 대한 연구를 수행하고자 한다. STATCOM은 복잡한 전력 계통을 안정화하고 공급전원을 일정하게 유지할 목적으로 제안된 기술이다. 기존의 전력 보상 장치에 비해 전력 제어 범위가 상당히 넓은 편이며, 시스템 구성요소가 비선형적 움직임을 보이고 있다. 또한, 외부 환경에 따른 파라미터 변동이 있기 때문에 시스템 제어를 위한 새로운 기법 마련이 필요하다. 이를 해결하기 위하여, 시스템을 퍼지 이론을 통해 접근하여 모델링을 수행하게 되며, 강인 안정도 해석을 통해 시스템의 불확실성 요소에 대한 대비를 하게 된다.

키워드 : STATCOM 발전 시스템, 비선형성, 강인 안정성, 퍼지 모델링,

Abstract

This paper deals with the robust stability analysis of STATCOM (Static Synchronous Compensator) power system for power quality enhancement and power system stability. The STATCOM plays an important role in controlling the reactive power flow to the power network and hence the system voltage fluctuations and stability. The control areas of this plant are very large and the overall composition of the system is nonlinear. Also, STATCOM is influence of the uncertainties so that it is necessary to apply the new control technique. For solving these problems, we perform the fuzzy modeling and robust analysis for STATCOM system.

Key Words : STATCOM power system, nonlinearity, robust stability, fuzzy modeling.

1. 서 론

최근 전력 발전 및 수송 시스템의 경우, 환경 문제와 경제성에 의한 송전선로 설치 제한, 급격한 부하증가에 의한 계통의 중 부하 운전, 그리고 앞으로 예견되는 발전 시스템 구조 개편 후의 효율적인 전력 운용의 필요성에 의해 새로운 패러다임으로의 전환을 요구받고 있다. 이와같은 연구 추세에서 가장 화두가 되고 있는 것은 바로 유연전송시스템 (Flexible AC Transmission System: FACTS) 이다. FACTS란, 반도체 소자를 이용하여 전기 흐름을 능동적으로 제어함으로써 대용량 전력 수송과 계통의 안정성을 동시에 가능케 하는 전력 전송 방식을 의미한다 [1]. 이는 시스템의 과도 안정도 및 전력 안정도를 고려한 것으로, FACTS의 핵심 기기로 지목되고 있는 것이 Forced communication을 이용한 무효전력보상장치 (Static Synchronous Compensator: STATCOM) 이다. STATCOM는 복잡한 전력 계통을 안정화 하고 공급 전원을 일정하게 유지할 목적으로 제안된 기술이며, 기존의 TSC (Thyristor Switched Capacitor)나 TCR (Thyristor Controlled Reactor)등 보다 나은 성능을 보여준다 [1, 2]. 그러나 STATCOM은 기존의 전력 보상 장치에 비해 전력 제어 범위가 상당히 넓은 편이며, 시스템 구성요소가 비선형적 움직임을 보이고 있다. 또한, 외부 환경에 따른 파라미터 변동이 있기 때문에 시스템 제어를 위한 새로운 기법 마련이 필요하다. 최근 STATCOM의 제어 방안에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으나, 제어 접근 이론의 부재로 인한 전력 안정도 해석에 어려움 때문에 STATCOM 시스템의 비선형성을 배제한 체 선형 제어 이론이 사용되고 있으며 [2], 이는 효율적인 제어 방안이라 보기는 어렵다. 따라서 FACTS의 실현을 위한 최선의 방안은 STATCOM 발전 시스템 모델에 대한 구체적인 해석과, 효과적인 제어 방안 마련에 있다는 점을 주목할 필요가 있다.

전력과 관계된 시스템의 실제적 플랜트 제어에 있어서 큰 문제 중 하나는 시스템에 존재하는 비선형성에 대한 해석을 어떻게 할 것인가 이다. 플랜트 구성요소들이 보여주는 비선형적 움직임은 가장 쉽게는 선형적인 움직임으로 치환되어 해석되고 있지만, 이는 시스템의 가장 최소한의 요

접수일자 : 2009년 11월 30일
완료일자 : 2010년 4월 1일
+ 책임저자
감사의 글 : 이 논문은 2009년도 기초전력연구원의 에너지 기술개발사업으로 지원 받아 수행된 연구임.

소만으로 구성되어 있다는 가정이 필요하기 때문에 실제라고 보기는 어렵다. 이를 극복하기 위하여 제안된 많은 이론 중 하나가 퍼지이론이다. 특히, Takagi-Sugeno (T-S) 모델은, 다른 시스템 모델링 기법에 비해 비선형 시스템과 매우 유사한 형태의 움직임을 보여 줌으로써 제어의 용이성을 높였다는 평가를 받고 있다 [4-6].

이와같은 관점에서, 본 논문에서는 전력 품질 개선 및 전력 계통 신뢰도 향상을 위한 STATCOM의 시스템 모델링 및 강인 안정성에 대한 연구를 수행하고자 한다. 앞서 언급하였듯이, STATCOM 발전 시스템은 각 구성요소들이 비선형성을 띄고 결합된 상태이며, 본 논문에서는 이를 T-S 퍼지 모델로 해석된 후, 부분적 선형 모델로 변환하는 과정을 수행하게 된다. 이를 통해 전력 시스템은 제어기 설계에 용이한 형태로 전환되며, 주어진 시스템은 리아푸노프 안정도 분석에 의해 안정도 가능성을 살펴보게 된다. 그리고 외부 환경에 의한 변화를 파라미터의 변환 범위로 설정하여 해석하게 되며, 이는 시스템의 안정도에 큰 영향을 미치는 요소로 판단하여 강인 제어의 기법으로 해석하게 된다. 전체 식은 선형행렬부등식 형태로 나타나게 되며, 1기 무한도선에 연결된 STATCOM 시스템의 시뮬레이션을 통해 제안된 기법의 우수성을 증명하게 된다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 T-S 퍼지 시스템을 수학적으로 표현하게 되며, 제어기 설계를 하게 된다. 3절에서는 STATCOM 시스템의 특성 및 모델에 관하여 알아본다. 4절에서는 2절에서 구성된 시스템의 안정도 가능성을 연구하게 되며 5절에서는 시뮬레이션을 수행하게 된다. 마지막 5절에서는 결론을 제시하며 본 논문은 마무리 된다.

2. 비선형 시스템 및 T-S 퍼지 모델

퍼지 모델은 IF-THEN을 사용하여 시스템을 묘사하기 위한 접근 방법으로 퍼지 집합을 이용하여 시스템을 모델링하는 것이다. 비선형 시스템은 다음과 같이 나타내어질 수 있다.

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t))$$
$$y(t) = h(x(t)) \tag{1}$$

여기서 $x(t) \in R^n$는 상태 벡터를 $u(t) \in R^m$는 입력 벡터를 의미한다. 위의 식 (1)은 다음의 퍼지 모델 식으로 표현 가능하다.

$$R^i: \mathit{IF}\ z_i(t)\ \mathit{is}\ \Gamma_1^i \text{ and } \cdots \text{ and } z_n(t)\ \mathit{is}\ \Gamma_n^i$$
$$\mathit{THEN}\ \dot{x}(t) = (A_i + \Delta A_i)x(t) + B_i u(t).$$
$$y(t) = (C_i + \Delta C_i)x(t) \tag{2}$$

여기서 $x(t) \in R^n$, $u(t) \in R^m$, R^i는 i번째 퍼지 규칙을, $z_h(t)$는 h번째 전건부 변수를 의미하며, A, B 그리고 C 는 적절한 크기를 지닌 실제 행렬이며, ΔA와 ΔC는 시스템에 포함된 파라미터 불확실성을 의미한다. Γ_h^i, i번째 규칙에서 h번째 전건부 변수의 퍼지 집합이다. 중심값-평균 비퍼지화, 곱셈 추론, 싱글톤 퍼지화를 사용하면 식 (2)는 다음과 같은 전역 동특성 식으로 나타나게 된다.

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^{r} \mu_i(z(t))((A_i + \Delta A_i)x(t) + B_i u(t))$$
$$y(t) = \sum_{i=1}^{r} \mu_i(z(t))(C_i + \Delta C_i)x(t) \tag{3}$$

여기서

$$\omega_i(z(t)) = \prod_{h=1}^{n} \Gamma_h^i(z_h(t)),$$
$$\mu_i(z(t)) = \frac{w_i(z(t))}{\sum_{i=1}^{r} \omega_i(z(t))}$$

이다. 상태 변수의 관측을 위해 다음의 관측기가 제안된다.

$$\dot{\hat{x}}(t) = \sum_{i=1}^{r} \mu_i(z(t))(A_i \hat{x}(t) + B_i u(t) + L_i(y(t) - \hat{y}(t))$$
$$y(t) = \sum_{i=1}^{r} \mu_i(z(t)) C_i \hat{x}(t) \tag{4}$$

여기서 $\hat{x}(t) \in R^n$는 $x(t)$의 측정치이며, L_i는 관측 이득값을 의미한다. 시스템 제어를 위해 다음과 같은 퍼지 제어기가 제안된다.

$$R^i: \mathit{IF}\ z_i(t)\ \mathit{is}\ \Gamma_1^i \text{ and } \cdots \text{ and } z_n(t)\ \mathit{is}\ \Gamma_n^i$$
$$\mathit{THEN}\ u(t) = K_i \hat{x}(t). \tag{5}$$

여기서 비퍼지화 출력값은 다음과 같다.

$$u(t) = -\sum_{i=1}^{r} \mu_i(z(t)) K_i \hat{x}(t). \tag{6}$$

T-S 퍼지 시스템은 비선형 모델에 대한 IF-THEN 규칙의 결합으로 구성되어 있다. 일반적인 전력 추종 (power regulation) 문제는 다음과 같은 제어 목적 (control objective)으로 나타내어진다.

$$P_t - P_d \to 0 \quad as \quad t \to \infty \tag{7}$$

여기서 P_d는 이상적인 전력(desired power)을 의미한다. 일반적인 비선형 모델은 T-S 퍼지 모델로 재구성 된다.

$$\sum_{i=1}^{q} h_i(z(t)) B_i u(t) = \sum_{i=1}^{q} h_i(z(t)) B_i u(t) - \sum_{i=1}^{q} h_i(z(t)) A_i x_d(t) + \dot{x}_d$$

추정 오차는 아래와 같이 구성된다.

$$\tilde{x}(t) = x(t) - x_d(t) \tag{8}$$

양변에 시간 미분을 취해주면, 전력 추종문제는 다음과 같이 퍼지 시스템의 안정화 문제로 귀결된다.

$$\dot{\tilde{x}}(t) = \sum_{i=1}^{q} h_i(z(t)) A_i \tilde{x}(t) - \sum_{i=1}^{q} h_i(z(t)) B_i u(t) \tag{9}$$

여기서 $\tilde{x}(t)$를 안정화 시킨다는 것은 본래 시스템의 궤적 $x(t)$가 이상 궤적 $x_d(t)$를 따라간다는 것을 의미한다.

3. STATCOM 시스템 구성 및 모델링

3.1 STATCOM 시스템 구성

제안된 전력 IT 기반 STATCOM은 다음과 같은 식으로 구성 된다 [1-2].

Mechanical Equations :

$$\dot{\omega} = -\frac{D}{H}(\omega - w_0) - \frac{\omega_0}{H}(P_e - P_m). \tag{10}$$

Generator Electrical Dynamics

$$\dot{E_q}' = \frac{1}{T_{do}'}[E_{fd} - E_q' - (x_d - x_d')I_{gd}]. \tag{11}$$

Electrical Equation :

$$\dot{I_s} = \frac{1}{T_s}(u_s - I_s), \quad -0.1 \le u_s \le 0.1, \tag{12}$$

여기서 δ는 발전기의 위상각(rad), ω는 발전기의 상대 속도, E_q'는 내부 전압, D는 관성 모멘트, 그리고 H는 감쇠 상수를 나타낸다. 주어진 식들은 각 상태 변수들이 서로 비선형 관계를 이루고 있으며, 파라미터가 가질 수 있는 불확실성에 대한 고려가 되어 있지 않다.

STATCOM을 구성하는 각 파라미터는 기본적으로 다음의 불확실성을 가지고 있다.

$$\triangle\dot{\delta} = 2\pi f_0 \triangle\omega, \ \triangle\dot{\omega} = -\frac{D}{H}\triangle\omega - \frac{\omega_0}{H}\triangle P_e. \tag{13}$$

특히 발전 계통 시스템의 경우 실제 플랜트를 축약하여 모델링되었기 때문에 주변 상황에 대한 고려는 부족한 것이 사실이다. 발전 시스템의 파라미터는 외부 환경에 많은 영향을 받기 때문에 특정 값이 정해져 있기 보다는, 일정 범위에서 바운드(Bound) 되어 있다고 보는 것이 정확하다. 그러나 이를 고려하여 STATCOM을 분석한 연구는 많이 이루어지지 않았다. 시스템의 활용에 있어 유연성을 높이기 위한 방안으로써 STATCOM의 강인성에 대한 연구가 필요하며, 본 논문에서는 강인 퍼지 제어기법을 제안함으로써 이를 해결하고자 한다.

3.2 STATCOM 시스템의 퍼지 모델링

그림 1은 STATCOM 3상 등가회로를 나타낸다. 아래 그림에서 L_s는 실제의 전력용 변압기의 인덕턴스를 나타내고, 직렬저항 R_s는 인버터와 변압기의 전도 손실을 나타낸다. 또한 커패시터와 병렬로 연결된 저항 R_p는

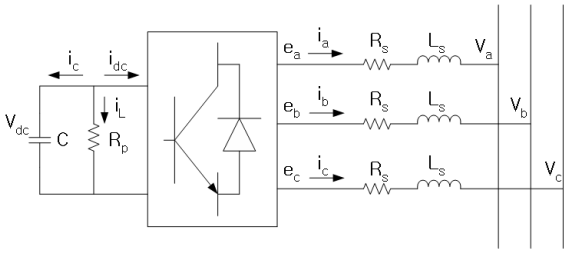


그림 1. STATCOM 3상 등가회로.
Fig. 1. STATCOM 3-phase equivalent circuit.

각 변수들을 이용하여 교류측에서 본 회로방정식을 각 상별로 세워 3상 전체에 대해 기술하면 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_s} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R_s}{L_s} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R_s}{L_s} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{1}{L_s}\begin{bmatrix} e_a - v_a \\ e_b - v_b \\ e_c - v_c \end{bmatrix} \tag{14}$$

3상변수를 2상변수로 변환하기 위한 방법으로 Park의 벡터 좌표 변환을 수행하면 다음과 같다.

$$[K] = \sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix} \cos(wt) & \cos(wt-\frac{2\pi}{3}) & \cos(wt+\frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(wt) & -\sin(wt-\frac{2\pi}{3}) & -\sin(wt+\frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \tag{15}$$

3상이 평형인 정상상태일 경우 동기 좌표상에서 전압과 전류의 벡터는 일정한 값을 갖는데 이러한 특징은 전압과 전류를 2가지 성분으로 해석하여 분리 제어를 하는데 상당히 유리하다. 회로 방정식 (15)에 대해 Park의 좌표 변환을 수행하여 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_s} & w \\ w & -\frac{R_s}{L_s} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{1}{L_s}\begin{bmatrix} e_d - |v| \\ e_q \end{bmatrix} \tag{16}$$

식 (16)에서 인버터의 교류와 직류 양 단자에서 순간적력은 동일하므로, 우선 다음의 전력 평형 방정식이 유도된다.

$$d_{vc} i_{dc} = \frac{3}{2}(e_d i_d + e_q i_q) \tag{17}$$

또한, 직류측에 키르히호프 전류 법칙을 이용하면 다음 회로 방정식이 유도된다.

$$\frac{dv_{dc}}{dt} = -\frac{1}{C} i_{dc} - \frac{v_{dc}}{R_p C} \tag{18}$$

전압 인버터의 출력 전압은 직류 링크 전압과 선형관계에 있으므로, 인버터전압의 d축과 q축의 성분 ed와 eq는 고조파를 무시할 경우, 다음 수식으로 설명 된다.

$$e_d = m v_{dc}\cos(\alpha), \quad e_q = m v_{dc}\sin(\alpha) \tag{19}$$

여기서 m은 인버터의 스위칭 방식과 관련된 계수로, 직류측 전압과 인버터단의 교류측 상전압 최대치와의 비를 나

타내고, α는 출력 전압과 교류전압간의 위상차를 나타낸다. 식 (17)-(19)에서 설명한 직류측 관계 방정식을 식 (16)에 대입하면, 아래와 같은 상태 방정식을 얻을 수 있게 된다.

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ v_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_s} & w & \frac{m}{L_s}cos\alpha \\ -w & -\frac{R_s}{L_s} & \frac{m}{L_s}sin\alpha \\ -\frac{3m}{2c}cos\alpha & -\frac{3m}{2c}sin\alpha & -\frac{1}{R_pC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ v_{dc} \end{bmatrix} - \frac{1}{L_s}\begin{bmatrix} |v| \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

위의 상태방정식을 pu 단위로 변환하면 다음과 같이 나타내어진다.

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} i_d' \\ i_q' \\ v_{dc}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s' w_b}{L_s'} & w_b & \frac{m}{L_s}w_b\cos\alpha \\ -w_b & -\frac{R_s' w_b}{L_s'} & \frac{m}{L_s}w_b\sin\alpha \\ -\frac{3m}{2}C' w_b\cos\alpha & -\frac{3m}{2}C' w_b\sin\alpha & -\frac{w_b C'}{R_p'} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_d' \\ i_q' \\ v_{dc}' \end{bmatrix} - \frac{w_b}{L_s}\begin{bmatrix} |v'| \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

식 (21)에서 나타난 비선형 파라미터는 바로 α로 이는 위에서 언급했듯이 출력 전압과 교류전압간의 위상차를 나타내고 있다. 이 위상차 값은 전압에 관계된 값으로 STATCOM을 구성하는 세 파라미터 - i_d, i_q, v_{dc} 중 v_{dc}와 관계된 값으로 표현되며, 각각 sin, cos 함수로 묶여 있기 때문에 적절한 형태로의 변형이 필요하다. $x_3(t) \in [M_1,\ M_2]$라 했을 때, 식 (21)은 아래와 같은 2개의 규칙을 가진 T-S 퍼지 모델로 나타낼 수 있다.

R^1: *IF* $x(t)$ *is about* M_1 *THEN* $\dot{x}(t) = A_1 x(t) + B_1 u(t)$

R^2: *IF* $x(t)$ *is about* M_2 *THEN* $\dot{x}(t) = A_2 x(t) + B_2 u(t)$

여기서

$$A_1 = \begin{bmatrix} -\frac{R_s' w_b}{L_s'} & w_b & \frac{m}{L_s}w_b\sqrt{1-M_1^2} \\ -w_b & -\frac{R_s' w_b}{L_s'} & \frac{m}{L_s}w_b M_1 \\ -\frac{3m}{2}C' w_b\sqrt{1-M_1^2} & -\frac{3m}{2}C' w_b M_1 & -\frac{w_b C'}{R_p'} \end{bmatrix},$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} -\frac{R_s' w_b}{L_s'} & w_b & \frac{m}{L_s}w_b\phi\sqrt{1-M_2^2} \\ -w_b & -\frac{R_s' w_b}{L_s'} & \frac{m}{L_s}w_b\phi M_2 \\ -\frac{3m}{2}C' w_b\phi\sqrt{1-M_2^2} & -\frac{3m}{2}C' w_b\phi M_2 & -\frac{w_b C'}{R_p'} \end{bmatrix}$$

$$B_1 = B_2 = \frac{w_b}{L_s}\begin{bmatrix} |v'| \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

그리고 각각의 멤버쉽 함수는 아래와 같다.

$$\Gamma_1 = \frac{\sin(x(t)) - \phi x(t)}{(1-\phi)x(t)},\ \Gamma_2 = \frac{x(t) - \sin(x(t))}{(1-\phi)x(t)}$$

여기서 $\phi = \sin^{-1}(Max(M_1, M_2))$ 이다.

4. 강인 안정도 해석

다음과 같은 리아푸노프 (Lyapunov) 식을 고려해보자.

$$V(\chi(t)) = x^T(t)Px(t) + e^T(t)Re(t) \quad (22)$$

여기서 $\chi(t) = [x^T(t),\ e^T(t)]$ 이며, P와 R은 양한정 행렬이다. 가정 1 및 보조 정리 1, 2에 의하여 $V(\chi(t))$의 시간에 대한 미분 함수는 다음과 같이 나타내어진다.

$$\dot{V}(\chi(t)) = \sum_{i=1}^{q}\sum_{j=1}^{q}\mu_i(z(t))\mu_j(z(t))(x^T(t)(G_{ij}^T P + PG_{ij}) \times x(t)) + 2x^T(t)PB_iK_je(t) + 2e^T(t)R(\Delta A_i - L_j\Delta C_i)x(t) + e^T(t)(H_{jj}^T R + RH_{ij})e(t))$$

여기서 $G_{ij} = A_i + \Delta A_i - B_iK_j$이며, $H_{ij} = A_i - L_iC_j$이다. 이에 대한 식을 구체적으로 전개하기 위해, 다음의 두 가정을 도입하게 된다.

가정 1 [4]: 불확실성을 나타내는 행렬 $\triangle A_i$와 $\triangle C_i$는 다음과 같이 나타내어진다.

$$[\triangle A_i \quad \triangle C_i] = D_iF_i(t)[E_{1i} \quad E_{2i}]$$

여기서 D_i, E_{1i} 와 E_{2i}는 알고 있는 실수 행렬이며, $F_i(t)$는 모르는 행렬로 $F_i(t)^TF_i(t) \le I$ 와 같은 특징을 지니고 있다.

가정 2 [4]: 어떤 적절한 공간을 지닌 실수 행렬 $\Lambda_1 = \Lambda_1^T$, Λ_2, $\Lambda_3(t)$, 그리고 Λ_4 에서 다음의 부등식을 가정하자:

$$\Lambda_1 + \Lambda_2\Lambda_3(t)\Lambda_4 + \Lambda_4^T\Lambda_3(t)\Lambda_2^T < 0$$

여기서 $\Lambda_3(t)$는 $\Lambda_3(t)^T\Lambda_3(t) \le I$ 를 만족할 때, 어떤 $\varepsilon > 0$에 대해 필요 충분 조건으로 다음을 만족한다.

$$\Lambda_1 + [\varepsilon^{-1}\Lambda_4 \quad \varepsilon\Lambda_2]\begin{bmatrix} \varepsilon^{-1}\Lambda_4 \\ \varepsilon\Lambda_2^T \end{bmatrix} < 0$$

위의 과정과 더불어, $\dot{V}(\chi(t))$에 대한 계산을 위해 다음과 같은 제안을 도입하자.

제안 1: *$\dot{V}(\chi(t))$에 포함되어 있는 불확실 식은 다음과 같은 부등식으로 나타내어질 수 있다.*

$$x^T(t)(\Delta A_i^T P + P\Delta A_i)x(t) \le \epsilon_1 x^T(t)E_a^T E_a x(t) + \epsilon_1^{-1}x^T(t)PD_iD_i^T Px(t)$$

여기서 ϵ_1은 음이 아닌 상수이다.

제안 1을 통해 시스템 (7-9)를 안정화 하는 다음의 선형 행렬 부등식을 얻게 된다.

정리 1: *행렬 $Q=Q^T>0$, $R=R^T>0$, M_i, N_i 과 상수 ϵ_1, ϵ_2, ϵ_3에 대해 다음의 선형 행렬 부등식이 만족한다면, 식 (9)은 점진적으로 안정하다.*

$$\begin{bmatrix} \psi_{ij} & * & * & * & * \\ K_j^T B_i^T P & \Omega_{ij} & * & * & * \\ D_i^T & 0 & -\epsilon_1 I & * & * \\ 0 & D_i^T R & 0 & -\epsilon_2 I & * \\ 0 & D_i^T L_j^T & 0 & 0 & -\epsilon_3 I \end{bmatrix} < 0 \quad (23)$$

위 식 (23)에서, $\Phi_{ij}=A_i^TP+PA_i-K_jB_i^TP-PB_iK_j$, $\Omega_{ij}=A_i^TR+RA_i-C_jL_i^TR-RL_iC_j$, 퍼지 제어 이득 값은 $K_i=M_iQ^{-1}$로 나타내어지며, 퍼지 관측 이득 값은 $L_i=N_iR^{-1}$이다.

증명: 가정 1과 2를 통해 (22)은 다음과 같이 풀린다.

$$\Phi_{ij}+[(E_{1i}+E_{2i}K_i+E_{1j}+E_{2j}K_j)^T \quad PD_i+PD_j]$$
$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{ij}^{-1}I & 0 \\ 0 & \varepsilon_{ij}I \end{bmatrix}\begin{bmatrix} E_{1i}+E_{2i}K_j+E_{1j}+E_{2j}K_i & 0 \\ (PD_i+PD_j)^T & 0 \end{bmatrix} < 0$$

여기서 $\Phi_{ij}=A_i^TP+PA_j+B_i^TK_j^TP+PB_jK_i+PZ_{ij}P$ 이다. Schur 식을 통해 우리는 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \Phi_{ij} & * & * \\ E_{1i}+E_{2i}K_j+E_{1i}+E_{2i}K_j & -\varepsilon_{ij}I & * \\ D_i^TP+D_j^TP & 0 & -\varepsilon_{ij}^{-1}I \end{bmatrix} < 0 \quad (24)$$

양변에 대각 행렬 $diag[P^{-1} \quad I \quad I]$를 곱해주면, 식 (24)는 다음의 행렬 부등식 (Linear Matrix Inequality: LMI)으로 나타내어진다.

$$\begin{bmatrix} \psi_{ij} & * & * \\ E_{1i}Q+E_{2i}M_i+E_{1i}Q+E_{2i}M_j & -\varepsilon_{ij}I & * \\ D_i^T+D_j^T & 0 & -\varepsilon_{ij}^{-1}I \end{bmatrix} < 0 \quad (25)$$

여기서 $Q=P^{-1}$, $\psi_{ij}=QA_i^T+A_jQ+M_j^TB_i^T+B_jM_i+Z_{ij}$, $M_i=K_iP^{-1}$를 나타낸다.

5. 시뮬레이션 결과

3장에서 구성한 STATCOM 시스템의 퍼지 모델에 4장에서 제안된 강인 안정도 기법을 적용하여 이번 장에서는 STATCOM 시스템의 안정도 결과를 나타내보고자 한다. 우선, 구성된 STATCOM 시스템의 각 파라미터들은 다음과 같이 나타내어진다 [3].

표 1. STATCOM 구성 요소 파라미터

R_s'	0.01 p.u.
R_p'	100 kp.u.
L_s'	0.15 p.u.
C'	0.05 p.u.
wb'	377 rad s^{-1}
m	0.527

$$0.009 \le R_s \le 0.011 \quad (26)$$

정리 1에서 언급된 LMI 식을 STATCOM 시스템에 적용함으로써 우리가 목표로 한 강인 안정도 문제를 해결 할 수 있다. 초기 값은 $x_0=[1\ ;\ 1;1]$로 설정하였으며, 아래와 같은 입력 값을 산출해 낼 수 있다.

$$K_1=[0.0183,\ -0.0194,\ -0.0699],$$
$$K_2=[0.0770,\ -0.0200,\ -0.1077]$$

얻어진 두 입력 값 K_1과 K_2를 통해 시스템의 강인 안정도 결과를 분석하였으며, 아래와 같은 안정도 그래프를 얻을 수 있었다.

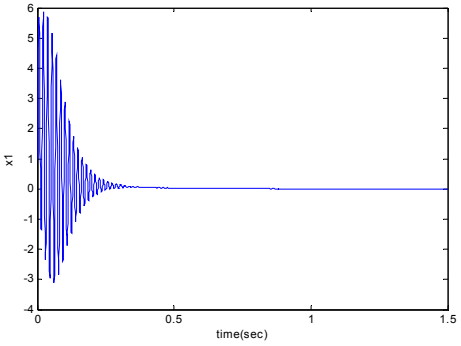


그림 2. STATCOM i_d 궤적.
Fig. 2. Trajectory of i_d in STATCOM.

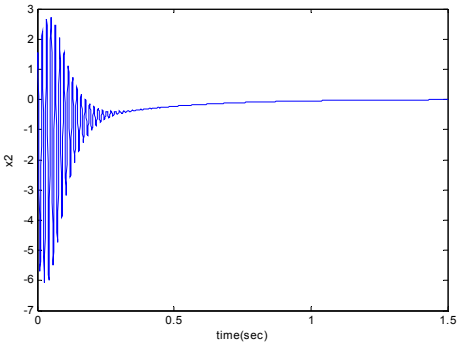


그림 3. STATCOM i_q 궤적.
Fig. 3. Trajectory of i_d in STATCOM.

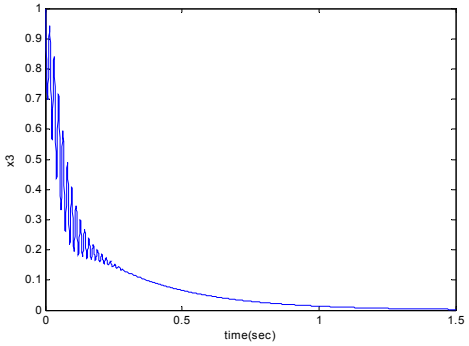


그림 4. STATCOM v_{dc} 궤적.
Fig. 4. Trajectory of v_{dc} in STATCOM.

그림 2-4를 통해 알 수 있듯이, 설계된 제어기는 STATCOM 발전 시스템의 안정도 보장을 위해 정상적으로 작동하였음을 알 수 있다. 이는 R_s 파라미터의 불확실성을 고려한 결과물로 강인 안정도 해석이라는 점을 주목할 필요가 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 전력 품질 개선을 위한 STATCOM 발전 시스템의 강인 안정도 해석에 대해 다루었다. 비선형적 구조를 가지고 있는 STATCOM 발전 시스템을 해석하기 위해 T-S 퍼지 모델링 기법을 적용하였다. 그리고 시스템의 강인 안정도 해석 방안을 LMI 형태로 나타내었다. 실제 STATCOM 발전 시스템을 구성하고 있는 파라미터로 시스템을 구성하였으며, 재해석된 퍼지 모델에 적합한 제어기를 설계를 통해 시스템의 안정도를 증명해 보았다. 그리고 시뮬레이션을 통해 제안 된 기법의 우수성을 증명하였다.

참 고 문 헌

[1] C. Li, Q. R. Jiang, Z. H. Wang, "Design of a nonlinear controller for STATCOM", *Power Syst. Technol*. vol. 22, no. 6, pp. 34-38, 1998.

[2] X. R. Xie, W. J. Cui, Y. L. Tang, "Coordinated control of STATCOM and generator excitation", *Autom. Electr. Power. Syst*., vol. 10, pp. 19-22, 2001.

[3] C. D. Schauder, H. Mehta, "Vector analysis and control advanced static var compensators", *IEE Proc-C*., vol. 140, no. 4, pp. 299-306, 1993.

[4] H. J. Lee, J. B. Park, and G. Chen, "Robust fuzzy control of nonlinear systems with parametric uncertainties," *IEEE Fuzzy Syst.* vol. 9. pp. 369-379, 2001.

[5] M. Chadli, A. E. Hajjaji, "Comment on ``Observer-based robust control of nonlinear systems with parametric uncertainties," *Fuzzy sets and Systems.*, vol. 134, pp. 1-6, 2005.

[6] B. Wie, *Spacecraft dynamics and control: applications of dynamical systems theory*, Lecture Note, Arizona State University, 1995.

[7] L. S. Shieh, X. M. ZHAO, and J. W. Sunkel, "Hybrid state-space self-tuning control using dual-rate sampling," *IEE Proc. Control Theory Appl*. vol. 138. pp. 50-58, 1991.

저 자 소 개

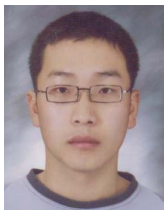
성화창 (Hwa Chang Sung)

2005년 8월 : 연세대학교 공학사
2007년 2월 : 연세대학교 공학석사
2007년 3월 ~ 현재 : 연세대학교 전기 전자 공학과 박사과정

Phone : 02-2123-2773
Fax : 02-362-4539
E-mail : casfirspear@yonsei.ac.kr

박진배 (Jin Bae Park)

제 19권 3호(2009년 6월호) 참조



탁명환 (Myung Hwan Tak)

2009년 : 군산대 전자정보공학부 졸업
2009년 ~ 현재 : 군산대학교 전자정보공학부 석사과정

관심분야 : 지능 제어, 유비쿼터스 센서네트워크, 지능형 로봇.

주영훈 (Young Hoon Jo)

제 19권 3호(2009년 6월호) 참조