수정된 출력을 이용한 다기 전력 계통의 분산 입출력 되먹임 선형화 제어

Decentralized Input-Output Feedback Linearizing Control for a Multi-Machine Power System using Output Modification

지 황*, 윤 태 웅**, 김 석 균***
(Hwang Jee, Tae-Woong Yoon, Seok-Kyoon Kim)

Abstract - This paper presents a decentralized input-output feedback linearizing controller for a multi-machine power system. Firstly, the controller is designed using input-output feedback linearization for modified outputs. Then we present a guideline for selecting gains of the controller and parameters in the modified outputs. Simulations illustrate the effectiveness of the proposed control scheme and the selection guideline.

Key Words : Decentralized control, Input-output feedback linearization, Multi-machine power system

1. 서론

전력시스템에서 부하의 변동이나 장애(fault)에 대해서도 안정한 전력을 공급하는 제어기 설계는 필수적이다. 기존 방식 중에서 AVR(Automatic Voltage Regulator)과 PSS (Power System Stabilization)을 사용한 방법은 동작점 부근에서 선형화하여 해석한 방법으로 큰 규모의 외란에 대해서는 만족할 성능을 발휘하기 어렵다.[8] 따라서 최근 전력 계통 안정화를 위한 제어방식으로 많은 비선형 제어 기법들이 제안되고 있다. 그 중, 되먹임 선형화를 통해 시스템을 선형화한 뒤, 선형 제어 기법을 적용하는 논문들이 있다[2][3]. [2]에서는 직접 되먹임 선형화 기법(DFL:Direct Feedback Linearization)을 이용하여 전력 시스템의 비선형성을 제거한 뒤, 시스템 파라미터의 불확실성을 고려한 강인 제어기를 제안하였다. 하지만, 위의 연구는 발전기 단자전압을 상태로 사용하지 않고 간접적인 방법을 통해 동작점으로 수렴시킨다. 이러한 문제를 해결하기 위해 전압을 포함한 새로운 상태방정식을 사용하여 전압을 추적하는 기법들도 제안되었다[1][5]. [1]에서는 [5]에서 제안한 1기 무한 모선 모델에서 DFL기법을 이용한 후 전압을 포함하는 새로운 상태 방정식을 다기 모델로 확장시킨 비선형 분산 전압 제어기를 제안하였다. 하지만, 이 과정에서 상호작용을 몇 가지 가정을 통해 무시했다는 단점이 있다.

본 논문에서는 다기 전력 계통의 수정한 출력을 이용하여 분산 입출력 되먹임 선형화 제어기를 설계한다. 그리고 상호작용항이 존재함에도 불구하고 출력이 유한할 수 있는 제어이득이 존재함을 보이고, 수정된 출력의 파라미터와 상호작용항의 관계에 대해서 연구한다.

저자 소개
* 지황 : 고려대학교 전기전자전파공학과 석사과정
** 윤태웅: 고려대학교 전기전자전파공학과 교수
*** 김석균: 고려대학교 전기전자전파공학과
석박사 통합과정

2. 다기 전력 모델

2.1 절 기계적 방정식(Mechanical Equations)

발전기의 기계적 방정식은 다음의 스윙 방정식(swing equation)으로 표현된다.[2][6]

$$\dot{\delta}_i(t) = \omega_i(t) \tag{1}$$

$$\dot{\omega}_i(t) = -\frac{D_i}{2H_i}\omega_i(t) + \frac{\omega_0}{2H_i}P_{mi0} - \frac{\omega_0}{2H_i}P_{ei}(t) \tag{2}$$

여기서, δ_i는 i번째 발전기의 동기각, ω_i는 i번째 발전기의 상대 주파수를 뜻한다. 그리고 P_{mi0}는 i번째 발전기의 기계적 입력으로 상수로 가정하고, P_{ei}는 i번째 발전기에서 발생하는 전기적 출력으로 발전기의 유효전력을 나타낸다. D_i와 H_i는 각각 제동 계수와 관성계수를 나타내는 상수값이다.

2.2 절 전기적 방정식(Electrical Equations)

i번째 발전기의 전기적 동특성인 횡축의 과도 기전력 E_{qi}'은 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{E}_{qi}'(t) = \frac{1}{T_{d0i}'}\left[k_{ci}u_{fi}(t) - E_{qi}'(t) - (x_{di} - x_{di}')I_{di}(t)\right] \tag{3}$$

여기서, E_{qi}횡축의 기전력, T_{d0i}'은 직축의 과도 단락 회로 시정수를 나타내고 x_{di}는 발전기의 직축 리액턴스를, x_{di}'는 발전기의 직축 과도 리액턴스를 의미한다. 그리고 대수 방정식으로 표현되는 발전기의 전기적 방정식은 아래와 같다.

$$P_{ei}(t) = \sum_{j=1}^{n} E_{qi}'(t)E_{qj}'(t)B_{ij}\sin(\delta_i(t) - \delta_j(t)) \tag{4}$$

$$Q_{ei}(t) = -\sum_{j=1}^{n} E_{qi}'(t)E_{qj}'(t)B_{ij}\cos(\delta_i(t) - \delta_i(t)) \tag{5}$$

$$I_{di}(t) = -\sum_{j=1}^{n} E_{qj}'(t)B_{ij}\cos(\delta_i(t) - \delta_j(t)) \tag{6}$$

$$I_{qi}(t)=\sum_{j=1}^{n}E_{qj}'(t)B_{ij}\sin(\delta_i(t)-\delta_j(t)) \quad (7)$$

여기서 n은 발전기의 개수를 의미하고, B_{ij}는 i번째 발전기와 j번째 발전기 사이의 내부노드를 간략하게 표현한 서셉턴스이다. 그리고 i번째 발전기의 단자 전압방정식은 아래와 같다.

$$V_{ti}(t)=\sqrt{(E_{qi}'(t)-x_{di}'I_{di}(t))^2+(x_{di}'I_{qi}(t))^2} \quad (8)$$

3. 비선형 분산제어기의 설계

3.1 출력 방정식의 수정

단자 전압 V_{ti}만을 출력으로 하여 입출력 되먹임 선형화를 할 경우에는 위상각과 주파수의 진동이 오래가는 문제가 있다. 따라서 출력을 아래와 같이 수정한다.[7]

$$y_i=V_{ti}^2-\alpha_i\omega_i \quad (9)$$

식 (9)와 같이 출력 방정식을 수정하여 입출력 되먹임 선형화를 한다.

3.2 분산 입출력 되먹임 선형화 제어기 설계

식 (9)와 같이 출력 방정식을 정하여 입출력 되먹임 선형화를 하기 위해 출력식을 미분하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}\dot{y}_i=&[2f_{1i}f_{2i}\frac{k_{ci}}{T_{d0i}'}u_{fi}-2f_{1i}f_{2i}\frac{E_{qi}'}{T_{d0i}'}-2f_{1i}f_{2i}(x_{di}-x_{di}')\frac{I_{di}}{T_{d0i}'}\\&-2(E_{qi}'-x_{di}'I_{di})x_{di}'V_sB_{in}\sin\delta_i\omega_i+2x_{di}'^2I_{qi}V_sB_{in}\cos\delta_i\omega_i+\gamma_i]\end{aligned} \quad (10)$$

여기서 $f_{1i}=E_{qi}'-x_{di}'I_{di}$, $f_{2i}=1+x_{di}'B_{ii}$이고 γ_i는 상호작용항으로서 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\gamma_i=&2x_{di}'E_{qi}'\sum_{j=1,j\neq i}^{n-1}\dot{E}_{qi}'B_{ij}\cos(\delta_i-\delta_j)\\&-2x_{di}'E_{qi}'\sum_{j=1,j\neq i}^{n-1}E_{qi}'B_{ij}\sin(\delta_i-\delta_j)(\omega_i-\omega_j)\\&-2x_{di}'^2I_{di}\sum_{j=1,j\neq i}^{n-1}\dot{E}_{qi}'B_{ij}\cos(\delta_i-\delta_j)\\&+2x_{di}'^2I_{di}\sum_{j=1,j\neq i}^{n-1}E_{qi}'B_{ij}\sin(\delta_i-\delta_j)(\omega_i-\omega_j)\\&+2x_{di}'^2I_{qi}\sum_{j=1,j\neq i}^{n-1}\dot{E}_{qi}'B_{ij}\sin(\delta_i-\delta_j)\\&+2x_{di}'^2I_{qi}\sum_{j=1,j\neq i}^{n-1}E_{qi}'B_{ij}\cos(\delta_i-\delta_j)(\omega_i-\omega_j)\end{aligned} \quad (11)$$

먼저 이러한 상호작용항의 영향을 무시하고 입출력 되먹임 선형화를 적용한다. 기준 전압을 1로 하고, 오차 e_i를 y_i-1라 정의하고 아래와 같은 식

$$\dot{e}_i|_{\gamma_i=0}+K_ie_i=0$$

이 만족하는 제어입력을 설계하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned}u_{i1}=&-\frac{T_{d0i}'}{k_{ci}}\frac{K_ie_i}{2f_{1i}}+\frac{E_{qi}'}{k_{ci}}+\frac{1}{k_{ci}}(x_{di}-x_{di}')I_{di}\\&+\frac{T_{d0i}'}{k_{ci}}\frac{1}{f_{2i}}x_{di}'V_sB_{ii}\sin\delta_i\omega_i-\frac{T_{d0i}'}{k_{ci}f_{1i}f_{2i}}x_{di}'^2I_{qi}V_sB_{ii}\cos\delta_i\omega_i\\&+\frac{\alpha_iT_{d0i}'}{2f_{1i}f_{2i}k_{ci}}(-\frac{D_i}{2H_i}\omega_i+\frac{\omega_0}{2H_i}P_{mi0}-\frac{\omega_0}{2H_i}P_{ei})\end{aligned} \quad (12)$$

3.3 상호작용항의 유계

여기에서는 [3]에서처럼 상호작용항 γ_i가 다음과 같은 부등식을 만족한다고 가정한다.

$$\begin{aligned}|\gamma_i|\leq&\sum_{j=1}^{n-1}\left\{8x_{di}'\frac{|P_{ei}|_{\max}}{|T_{d0j}'|_{\min}}+8x_{di}'^2\frac{|I_{di}|_{\max}^2}{|T_{d0j}'|_{\min}}+8x_{di}'^2\frac{|I_{qi}|_{\max}^2}{|T_{d0j}'|_{\min}}\right\}\\&+(2x_{di}'|P_{ei}|_{\max}+4x_{di}'^2|I_{di}|_{\max}|I_{qi}|_{\max})\sum_{j=1}^{n-1}|\omega_j|\\=:&\sum_{j=1}^{n-1}\{\gamma_{1i}+\gamma_{2i}|\omega_j|\}\end{aligned} \quad (13)$$

그리고 e_i의 정의와 [3]에 의해 다음 부등식이 성립함을 알 수 있다.

$$|\omega_j|\leq\frac{1}{\alpha_j}|e_j|+\frac{1}{\alpha_j}d_j \quad (14)$$

여기서 $d_j:=|V_{tj}^2-1|_{\max}$이고, $|V_{ti}^2-1|_{\max}$은 아래와 같다.

$$|V_{ti}^2-1|_{\max}:=\frac{|P_{ei}|_{\max}^2}{|E_{qj}'B_{ij}|_{\min}^2}+2x_{di}'|Q_{ei}|_{\max}+x_{di}'\{|I_{di}|_{\max}^2+|I_{qi}|_{\max}^2\}-1$$

3.4 오차 e_i의 유한성

이 절에서는 e_i가 유한하기 위한 제어이득 K_i의 존재성을 보인다. 다음과 같은 리아프노브 후보 함수를 고려한다.

$$V_i=\frac{1}{2}e_i^2 \quad (15)$$

이와 같은 리아프노브 함수를 미분하고 앞에서 설계한 제어기 u_{fi}를 이용하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}\dot{V}_i=&-K_ie_i^2+e_i\gamma_i\\\leq&-(K_i-\frac{1}{2\epsilon_1})e_i^2+\frac{\epsilon_1}{2}\sum_{j=1}^{n-1}\{\gamma_{1i}+\gamma_{2i}|\omega_j|\}^2\end{aligned} \quad (16)$$

앞의 식 (14)에서 정의한 상호작용항의 유계로부터 다음과 같이 리아프노브 함수를 정리할 수 있다.

$$\dot{V}_i\leq-(K_i-\frac{1}{2\epsilon_1})e_i^2+\frac{\epsilon_1}{2}\sum_{j=1}^{n-1}\left\{\gamma_{1i}^2+\frac{1}{\epsilon_2}+m_ie_j^2+m_id_j^2\right\}^2 \quad (17)$$

여기서

$$m_i:=\gamma_{2i}^2(\epsilon_2\gamma_{1i}^2+1)(1+\frac{1}{\alpha_i\epsilon_3}) \quad (18)$$

이다. 전체 다기 전력 시스템의 리아프노브 함수를 V_{total}이라고 하면 그 미분은 아래와 같다.

$$\begin{aligned}\dot{V}_{total}=&\sum_{i=1}^{n-1}\dot{V}_i\leq-\sum_{i=1}^{n-1}(K_i-\frac{1}{2\epsilon_1})e_i^2\\&+\frac{\epsilon_1}{2}\sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=1}^{n-1}\left\{\gamma_{1i}^2+\frac{1}{\epsilon_2}+m_ie_j^2+m_id_j^2\right\}^2\\=&-\sum_{i=1}^{n-1}(K_i-\frac{1}{2\epsilon_1})e_i^2\\&+\frac{\epsilon_1}{2}\sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=1}^{n-1}\left\{\gamma_{1j}^2+\frac{1}{\epsilon_2}+m_je_i^2+m_jd_i^2\right\}^2\\=&-\sum_{i=1}^{n-1}(K_i-\frac{1}{2\epsilon_1}-\frac{\epsilon_1}{2}\sum_{j=1}^{n-1}m_j)e_i^2\\&+\frac{\epsilon_1}{2}\sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=1}^{n-1}\left\{\gamma_{1j}^2+\frac{1}{\epsilon_2}+m_jd_i^2\right\}^2\end{aligned} \quad (19)$$

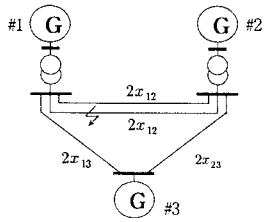
식 (19)로부터 K_i가 다음 조건

$$K_i>\frac{1}{2\epsilon_1}+\frac{\epsilon_1}{2}\sum_{j=1}^{n-1}m_j^2 \quad (20)$$

을 만족하면 오차 e_i가 유한함을 알 수 있다. 그리고 수정된 오차의 파라미터 α_i를 크게 할수록 m_i가 작아지게 되므로 (20)식을 만족하기 쉬워진다.

4. 모의 실험

이 장에서는 지락 사고가 발생하였을 때 앞에서 제안한 분산 비선형 제어기와 제어이득 K_i에 대한 부등식 (20)식의 지침을 이용한 모의실험 결과를 확인한다. 모의실험에 사용된 시스템은 그림 (4.1)과 같으며, 발전기 1과 2의 파라미터는 표(4.1)과 같다.[3]



그림(4.1) 모의실험에 사용된 전력 시스템

표(4.1) 각 발전기의 파라미터

	G #1	G #2		G #1	G #2
x_{di}	1.863	2.36	D_i	5	3
x_{qi}	0.257	0.319	ω_0	314.16	314.16
T_{qoi}'	6.9	7.96	ϵ	1	1
H_i	4	5.1			

모의실험은 차단기의 동작을 고려한 시나리오이며, 그 순서를 시간순으로 나열하면 다음과 같다.

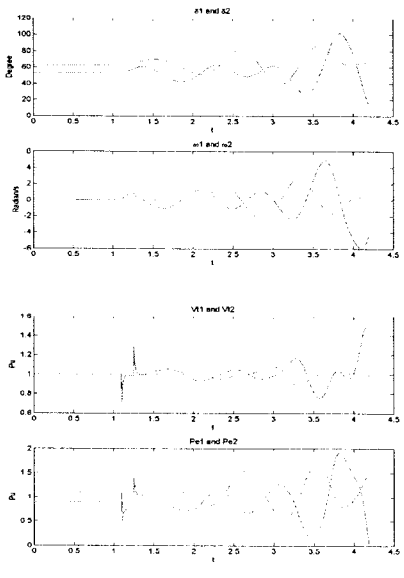
[1단계] 시스템이 정상상태에 있다.

[2단계] $t=1.1$초에서 사고가 발생한다.

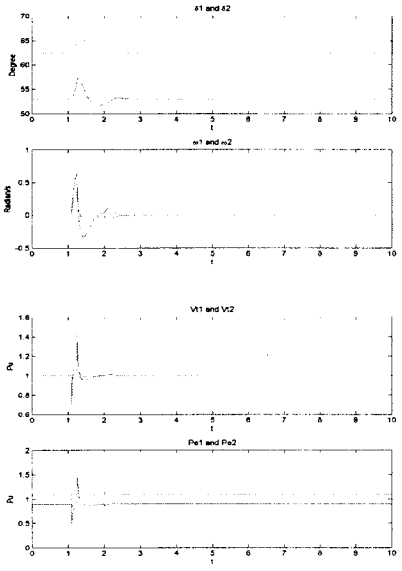
[3단계] $t=1.25$초에 차단기로 사고선로를 제거한다.

[4단계] $t=2$초에 전송선이 복구된다.

앞서 제안한 제어기의 제어이득 K_i에 대한 지침을 아래 두 모의실험을 통해 각각 확인한다.



그림(4.2) 모의실험 1 ($\alpha_i=0.01$, $K_i=10$)



그림(4.3) 모의실험 2 ($\alpha_i=0.1$, $K_i=10$)

5. 결론

4장의 모의실험 결과에서 알 수 바와 같이, 앞에서 제안한 비선형 분산 제어기와 제어이득 K_i를 통해 ω_i, V_{ti}, P_{ei}가 동작점으로 수렴함을 확인할 수 있다.

제안된 제어기는 수정된 출력방정식을 이용하였기 때문에 발전기 단자전압을 직접 제어할 수 있다. 또한, 다른 부시스템의 정보를 사용하지 않고도 제어기의 실현이 가능하다.

참 고 문 헌

[1] C. Zhu, R. Zhou and Y. Wang, " A New Decentralized Nonlinear Voltage Controller for Multimachine Power Systems." IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 13, No. 1, 1998, pp. 211-216

[2] Y. Wang, G. Guo and D. J. Hill, "Robust Decentralized Nonlinear Controller Design for Multimachine Power Systems." Automatica, Vol.33. No. 9, pp.1725-1733, 1997.

[3] Y. Guo, D. J. Hill and Y. Wang, "Nonlinear Decentralized Control of Large-Scale Power Systems", Automatica, Vol. 36, PP. 1275-1289, 2000

[4] D.-K. Lee, T.-W. Yoon, B. Lee and G.-T. Park. "Adapive Nonlinear Control of a Power System" In Proceedings of IEEE Conference on Control Application, pp. 1240-1244, Italy, 1998

[5] C. Zhu, R. Zhou and Y. Wang, "A New Nonlinear Voltage Controller for Power Systems." Electrical Power & Energy Systems, Vol. 19, No.1, 1997, pp.19-27

[6] P. M. Anderson and A. A. Fouad, "Power System

Stability and Control",Iowa State University Press, Ames, Iowa,1977
[7] 김동건, 윤태웅, 김석균, "1기 무한 모선 전력계통의 비선형 입출력 되먹임 선형화 제어", Journal of Control, Automation and Systems Engineering Vol. 11, No.8, August 2005.
[8] Y. Wang, D. Hill, R. Middleton, and L. Gao, "Transient stability enhancement and voltage regulation of power system", IEEE Transcation on Power System, Vol. 8, No.2, pp.620-62, May 1992

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 (R01200300011613020004)지원에 의해 수행되었고 지원에 감사드립니다.