

# 궤환선형화 기법을 이용한 3상 4선식 동적전압보상기의 제어

정선영, 이동춘  
영남대학교

## Control of Three-Phase Four-Wire Dynamic Voltage Restorers Using Feedback Linearization

Seon Yeong Jeong and Dong Choon Lee  
Yeungnam University

### ABSTRACT

본 논문은 계통전압의 순간전압 강하시 궤환선형화 기법을 이용한 3상 4선식 동적전압보상기의 제어 알고리즘을 제안한다. 궤환선형화 기법은 시스템의 비선형성을 제거하여 우수한 동특성을 얻을 수 있다. 제안된 제어기법은 시뮬레이션을 통하여 그 타당성이 입증된다.

### 1. 서론

전력 계통에서 3상 4선식 배선방식은 단상부하와 3상 부하를 혼합하여 사용할 수 있다. 동적전압보상기(DVR)는 계통 전압에 순간전압강하 발생 시 전압 감소분만큼의 보상전압을 주입하여 부하에 공급되는 전압의 크기를 일정하게 유지시킬 수 있다.

궤환선형화 기법은 시스템 동적모델의 비선형성을 보상하여 시스템을 선형화하고, 이를 선형 제어 이론을 적용한 제어기로 제어하는 기법이다. 본 연구에서는 LC필터를 적용한 3상 4선식 DVR 인버터의 모델링 및 시스템 선형화를 위한 궤환선형화 기법을 소개한다. 입출력 식으로부터 인버터 출력전압과 필터를 거친 DVR의 출력전압을 하나의 비선형 시스템으로 모델링하고 입출력 선형화 기법을 적용하여 시스템을 선형화하는 기법을 제안한다. 제안된 제어기법은 시뮬레이션을 통해 그 성능을 검증한다

### 2. 3상 4선식 동적전압보상기(DVR)

#### 2.1 시스템 모델링

그림 1은 3상 4선식 DVR의 회로를 보인다. DVR은 영상성분을 주입하기 위한 3상 4선 split capacitor PWM 인버터, 정현파 출력을 위한 LC필터, 단상변압기 3대 그리고 DC 전원장치로 구성된다.  $L_f$ 는 필터 인덕턴스,  $C_f$ 는 필터 커패시턴스,  $L_n$ 은 중성선 인덕턴스이다. 이 시스템은 식(1)과 같이 인버터 출력전압을 입력으로 하는 LC필터와 DVR 출력 전압의 비선형 상태방정식으로 표현된다.  $i_{fd}, i_{fq}, i_{fn}$ 은 인버터 출력전류,  $i_{ld}, i_{lq}, i_{ln}$ 은 필터 출력전류,  $v_{id}, v_{iq}, v_{in}$ 은 인버터 출력전압,  $v_{cd}, v_{cq}, v_{cn}$ 은 DVR의 최종 출력 전압이다.  $\omega$ 는 전원각주파수를 의미한다.

설계 된 시스템의 정격은 3kW이며, 스위칭주파수는 5kHz,

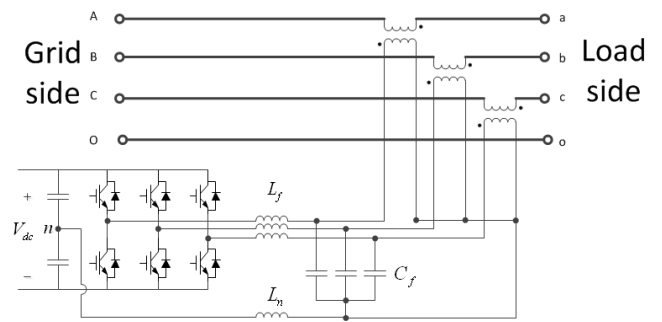


그림 1 3상 4선식 DVR

Fig.1. Three-phase four-wire DVR

LC 필터의 차단주파수는 451Hz이다. 변압기의 권수비는 1:1이며 이상적이라고 가정한다.

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_d \\ \dot{i}_q \\ \dot{i}_n \\ \dot{v}_{cd} \\ \dot{v}_{cq} \\ \dot{v}_{cn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega & 0 & -1/L_f & 0 & 0 \\ -\omega & 0 & 0 & 0 & -1/L_f & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1/(L_f+3L_n) \\ 1/C_f & 0 & 0 & 0 & \omega & 0 \\ 0 & 1/C_f & 0 & -\omega & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/C_f & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_n \\ v_{cd} \\ v_{cq} \\ v_{cn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$+ \begin{bmatrix} 1/L_f & 0 & 0 \\ 0 & 1/L_f & 0 \\ 0 & 0 & 1/(L_f+3L_n) \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{id} \\ v_{iq} \\ v_{in} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -i_{ld}/C_f \\ -i_{lq}/C_f \\ -i_{ln}/C_f \end{bmatrix}$$

#### 2.2 궤환선형화 제어기법을 이용한 비선형 제어

그림 2는 입출력 궤환선형화 제어의 블록도를 보인다. 시스템에 존재하는 입출력의 비선형 관계를 디커플링하여 시스템을 선형화하고, 이에 선형제어이론을 적용하여 제어기를 설계한다.

입출력 선형화 제어를 적용하기 위해 식(1)을 식(2)와 같은 표준형으로 변형한다.

$$\dot{x} = f(x) + gu \quad (2)$$

$$y = h(x)$$

여기서  $x$ 와  $u$ 는 상태벡터와 제어벡터이고,  $f(x)$ 는 상태벡터  $x$ 의 비선형 함수,  $g$ 는 제어벡터  $u$ 의 계수행렬, 그리고  $h(x)$ 는 출력벡터이다.

입력  $u = v_i$ 과 출력  $y = v_c$ 의 선형 관계를 찾을 때까지  $y = v_c$ 를 미분하면 식(3)과 같다.

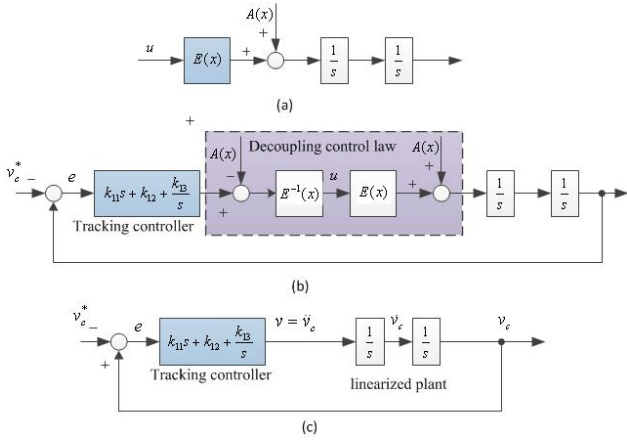


그림 2 궤환선형화 제어의 제어블록도

Fig. 2. Control block diagram of feedback linearization

- (a) 입출력 관계로 나타낸 플랜트 (b) 디커플링을 통한 입출력 선형화  
(c) 궤환선형화 된 시스템의 제어블록도

$$\ddot{y} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_f C_f} v_{id} - \left( \frac{1}{L_f C_f} + \omega^2 \right) v_{cd} + \frac{2}{C_f} \omega i_{fq} - \frac{1}{C_f} \dot{i}_{id} - \frac{1}{C_f} \omega i_{iq} \\ \frac{1}{L_f C_f} v_{iq} - \left( \frac{1}{L_f C_f} + \omega^2 \right) v_{cq} - \frac{2}{C_f} \omega i_{fd} - \frac{1}{C_f} \dot{i}_{iq} + \frac{1}{C_f} \omega i_{id} \\ \frac{1}{(L_f + 3L_n) C_f} v_{in} - \frac{1}{(L_f + 3L_n) C_f} v_{cn} - \frac{1}{C_f} \dot{i}_{in} \end{bmatrix} \quad (3)$$

식(3)에서  $y$ 의 총 상대차수는 6으로, 주어진 시스템의 차수와 같으므로 내부 다이나믹스는 존재하지 않는다. 그러므로 주어지는 변환된 시스템만 고려하면 된다.

시스템의 입출력 관계는 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\ddot{y} = A(x) + E(x) \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서,

$$A(x) = \begin{bmatrix} -\left( \frac{1}{L_f C_f} + \omega^2 \right) v_{cd} + \frac{2}{C_f} \omega i_{fq} - \frac{1}{C_f} \dot{i}_{id} - \frac{1}{C_f} \omega i_{iq} \\ -\left( \frac{1}{L_f C_f} + \omega^2 \right) v_{cq} - \frac{2}{C_f} \omega i_{fd} - \frac{1}{C_f} \dot{i}_{iq} + \frac{1}{C_f} \omega i_{id} \\ -\frac{1}{(L_f + 3L_n) C_f} v_{cn} - \frac{1}{C_f} \dot{i}_{in} \end{bmatrix}$$

$$E(x) = \begin{bmatrix} 1/L_f C_f & 0 & 0 \\ 0 & 1/L_f C_f & 0 \\ 0 & 0 & 1/(L_f + 3L_n) C_f \end{bmatrix}$$

$E(x)$ 의 역행렬이 존재하므로 시스템의 선형화를 위한 디커플링 제어입력을 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} = E^{-1}(x) \left[ -A(x) + \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} \right] \quad (5)$$

추종제어기의 출력이 지령치를 추종하게 하기 위한 새로운 제어입력을 다음과 같이 표기할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ddot{y}_{1ref} - k_1 \dot{e}_1 - k_2 e_1 - k_3 \int e_1 \\ \ddot{y}_{2ref} - k_1 \dot{e}_2 - k_2 e_2 - k_3 \int e_2 \\ \ddot{y}_{3ref} - k_1 \dot{e}_3 - k_2 e_3 - k_3 \int e_3 \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서  $e_1 = y_1 - y_{1ref}$ ,  $e_2 = y_2 - y_{2ref}$ ,  $e_3 = y_3 - y_{3ref}$ .

궤환선형화 기법은 시스템 정수의 변동에 민감하므로 이의 해결을 위해 식에 적분항을 추가하였다. 제어기의 이득을 극점을 좌반부에 배치함으로써 오차가 점근적으로 0에 수렴하도록 추종제어를 할 수 있다.

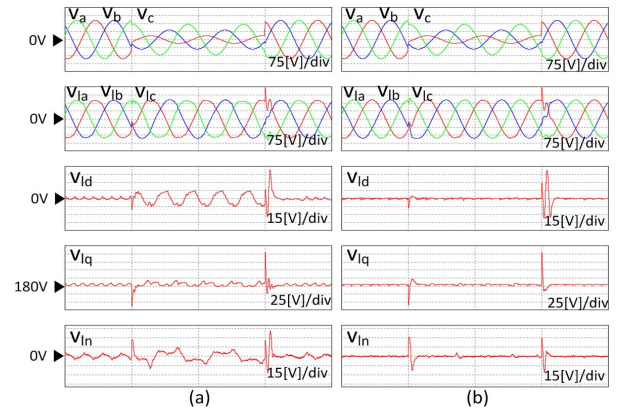


그림 3 불평형상태의 순간전압강하가 보상된 부하전압

Fig. 3. Load voltage compensated unbalance sag

- (a) PI 제어기 (b) 궤환선형화 제어기

표 1 보상된 부하전압의 THD(%)

Table 1. THD of Compensated Load voltage (%)

부하	순간전압강하	PI 제어기			궤환선형화 제어기		
		a	b	c	a	b	c
선형부하	평형	0.31	0.36	0.34	0.25	0.24	0.24
	불평형	4.01	4.01	4.01	0.22	0.27	0.30
비선형부하	평형	3.3	3.2	3.5	1.69	1.11	1.68
	불평형	4.37	4.09	6.37	1.82	0.84	0.92

### 2.3 시뮬레이션 결과

제어기의 성능을 검증하기 위해 평형 순간전압강하는 각 상마다 0.8p.u., 불평형 순간전압강하는 a상 0.8p.u., b상 0.5p.u., c상 0.2p.u.를 적용하여 시뮬레이션 하였다. 그림 3은 불평형 순간전압강하를 보상한 파형이다. 궤환선형화 기법을 적용한 제어기는 PI제어기에 비해 빠른 응답속도를 보인다. 표 1은 평형상태와 불평형상태의 순간전압 강하 발생 시 보상된 부하전압의 THD를 나타낸다. 평형순간전압 강하시 두 제어기 모두 THD가 낮다. 불평형 순간전압강하 발생 시 궤환선형화 이론을 적용한 제어기에 의해 보상된 부하전압의 THD가 PI제어기를 적용한 부하전압보다 현저히 낮다. 비선형부하에서도 궤환선형화 이론을 사용한 제어기의 성능이 더 우수함을 알 수 있다.

### 3. 결론

본 논문은 3상 4선 계통에서 split capacitor 인버터를 사용한 DVR의 궤환선형화 기법을 제안하였다. 제안된 궤환선형화 제어 기법의 성능 검증을 위해 PSIM 시뮬레이션을 수행하였다. 기존의 방식보다 응답속도가 빠르며 부하에 전압을 보다 안정적으로 공급할 수 있음을 보였다.

### 참고 문헌

- [1] C. Zhan, A. Arulampalam, and N. Jenkins, "Four Wire Dynamic Voltage Restorer Based on a Three Dimensional Voltage Space Vector PWM Algorithm", IEEE Trans. on Power Electron., vol. 18, no. 4, pp. 1093-1102, Jul. 2003.
- [2] JJE Slotine, W Li, Applied Nonlinear Control, Prentice HallIndianapolis, IN pp.207-270, 1991