

독립형 풍력발전 시스템의 CVCF 제어

김형균, Ahmed Abo-Khalil, 이동춘, 석줄기
 영남대학교 전자정보공학부

CVCF Control of Stand-Alone Wind Power System

H.K. Kim, A. Abo-Khalil, D.C. Lee, and J.K. Seok
 School of Electrical Eng. and Computer Science, Yeungnam University

ABSTRACT

In this paper, a novel nonlinear control method of the CVCF(constant voltage and constant frequency) output voltage for the three-phase PWM inverter is proposed, which gives high dynamic responses at load variation as well as zero steady-state error. The experimental results are shown to verify the validity of the proposed scheme.

1. 서 론

풍력발전은 부하에 따라 계통연계형과 독립형으로 구분이 되는데, 계통연계형의 경우 발전이 중단되더라도 부하는 계통으로부터 전력을 공급받을 수 있지만, 독립형의 경우 발전이 중단되면 지속적인 전력공급을 위해 축전지와 디젤 발전기 등을 복합적으로 사용하고 있다. 따라서 독립형 풍력발전시스템에 적용이 가능하고, 축전지에 저장된 에너지를 일정전압 일정주파수(CVCF)로 변환하는 UPS 인버터 시스템의 새로운 제어기법에 대해 본 연구에서 제안한다.

UPS 인버터의 제어방법으로 여러 제어기법들이 연구되고 제안되어 왔다^{[1]~[3]}. UPS의 성능은 출력전압의 고조파율(THD)과 과도응답특성에 의해서 평가된다. THD를 5% 이내로 제한하고 빠른 과도응답특성을 얻기 위해 다양한 제어기법이 제안되었다. 그 중에서 데드비트제어가 과도응답특성이 빠르기 때문에 일반적으로 많이 사용된다^[4]. 그러나 데드비트 제어는 파라미터의 변동이나 피드백 노이즈 등에 민감하여 동작이 불안정해지기 쉽다. 이런 단점을 보완하기 위한 개선된 데드비트 제어가 제안된 바 있다^[5].

본 논문에서는 독립형 풍력발전 시스템에 적용이 가능한 UPS 인버터 시스템을 개발하고, 입출력 변환선형화 기법을 응용하여 인버터 시스템 제어에

응용하고자 한다^[6]. 먼저 UPS 시스템의 비선형 모델을 유도하고 변환선형화 기법을 적용하여 선형화시킨 후 선형제어이론에 의해 제어기를 설계한다. 시스템 모델링에서 d-축 전류 시스템을 분리하여 d-축 전류는 d-축 전압에 의해 독립적으로 제어되도록 한다. 이 경우 시스템은 단일변수의 비선형 시스템이 되어 다변수 비선형 시스템에 비하여 제어기의 설계가 간편하고 인버터 직류측 전류가 제어되므로 과도상태시 시스템의 제어특성을 향상시킬 수가 있다^[7]. 실험을 통해 제안된 제어기법의 타당성을 보인다.

2. 독립형 풍력발전시스템

그림 1은 독립형 풍력발전 시스템의 전체 블록도를 보인다. 풍력에너지를 전기에너지로 변환하기 위해서는 블레이드로부터 입력된 풍력에너지를 기계에너지로 변환하고 이를 발전기를 이용하여 다시 전기에너지로 변환하여야 한다. 그림 1과 같은 시스템을 시뮬레이터로 구현할 경우 블레이드는 직류 전동기로 대체할 수 있다. 가변 풍속에 대해 발전기 출력을 최대 발생하기 위하여 발전기측 컨버터에서 최대출력제어 알고리즘을 수행하며, 발생된 전력을 배터리 뱅크에 저장한다. 저장된 전기에너지를 부하의 변동에 관계없이 일정전압, 일정주파수의 전압을 부하에 공급하기 위해 부하측 인버터는 비선형제어를 수행한다.

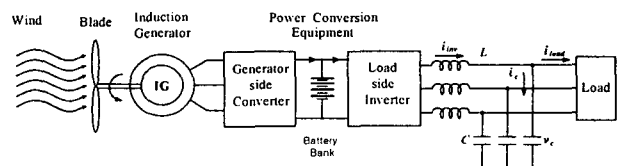


그림 1 독립형 풍력발전시스템
 Fig. 1 Stand-alone wind power system

3. 인버터의 CVCF 제어기법

직류 배터리에 저장된 에너지를 부하에 공급하고자 할 때 dc-ac 변환용 인버터를 사용한다. 이 PWM 인버터의 출력단에는 고조파 전압을 줄이기 위해 그림 2와 같이 LC 필터가 연결된다. 부하 변동시 인버터 출력전압을 일정하게 유지하기 위해 출력전압 제어루프를 두며, 또한 제어의 속응성을 높이기 위해 내부에 전류 제어루프를 둔다. 기존의 PI 제어기만으로는 응답의 한계가 있으므로 본 연구에서는 비선형제어 이론을 도입하여 출력전압을 제어하고자 한다.

3.1 시스템 모델링

그림 2는 PWM 인버터와 LC Filter를 가지는 정현과 출력 인버터 시스템의 전력회로도를 나타낸다. 시스템 입력과 출력의 관계에 의해서 인버터의 회로방정식은 다음과 같은 미분방정식으로 표현된다.

$$C \frac{dV_c}{dt} = I_{inv} - I_{load} \quad (1)$$

$$L \frac{dI_{inv}}{dt} = V_i - V_c \quad (2)$$

$$V_c = [v_{ca}, v_{cb}, v_{cc}]^T, \quad V_i = [v_a, v_b, v_c]^T$$

$$I_{inv} = [i_a, i_b, i_c]^T, \quad I_{load} = [i_{la}, i_{lb}, i_{lc}]^T$$

여기서, V_i , V_c , I_{inv} , I_{load} 는 각각 인버터 전압, 커패시터 전압, 인버터 전류와 부하전류이다. 그리고 L , C 는 각각 출력필터의 인덕턴스와 커패시터의 값이다.

식 (1)과 (2)를 회전좌표계상에서 표시하면 d-q축 전압, 전류 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{v}_{cq} = \frac{1}{C} i_q - \omega v_{cd} - \frac{1}{C} i_{lq} \quad (3)$$

$$\dot{v}_{cd} = \frac{1}{C} i_d + \omega v_{cq} - \frac{1}{C} i_{ld} \quad (4)$$

$$\dot{i}_q = \frac{1}{L} v_q - \omega i_d - \frac{1}{L} v_{cq} \quad (5)$$

$$\dot{i}_d = \frac{1}{L} v_d + \omega i_q - \frac{1}{L} v_{cd} \quad (6)$$

여기서, v_{cb} , v_{cq} 는 출력 커패시터의 d-q축 전압, v_d , v_q 는 인버터 d-q축 출력전압, i_d , i_q 는 인버터d-q축 출력전류, i_{ld} , i_{lq} 는 부하에 흐르는 d-q축 출력전류이고 ω 는 출력전압의 각주파수이다.

직류링크단의 입력전력이 순시적으로 부하와 커패시터에 공급된다면 직류입력과 교류출력의 전력평형식으로부터 식 (7)을 얻을 수 있다.

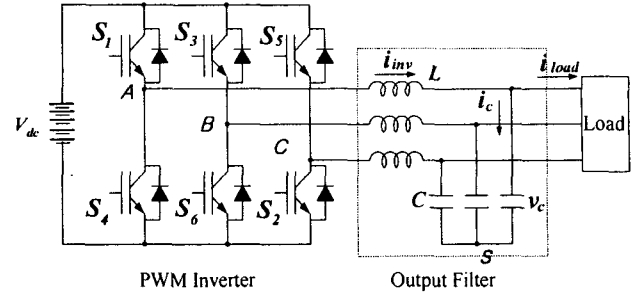


그림 2 인버터 시스템의 구성
Fig. 2 Configuration of inverter system

$$V_{dc} I_{dc} = \frac{3}{2} (v_{cq} i_{lq} + v_{cd} i_{ld}) \quad (7)$$

여기서, V_{dc} 와 I_{dc} 는 직류링크단의 전압과 전류이다.

3상이 평형이면 회전좌표축을 적절히 조절하여 $v_{cq} = V_m$, $v_{cd} = 0$ 이 되도록 선정하고 단위역률이 되도록 제어를 수행한다. d-q 좌표축변환에 의해 발생한 성분인 $\omega L i_q$, $\omega C v_{cb}$, $\omega C v_{cq}$ 를 제거기 마지막 단계에서 전향(feedforward) 보상한다면 비선형방정식에서 이 항들이 배제될 수 있다.

3상 정현과 출력 인버터의 전압을 제어하기 위한 비선형모델은 다음과 같이 얻어진다. 먼저, q축 부하전류는 식 (3)로부터 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$i_{lq} = i_q - C \dot{v}_{cq} \quad (8)$$

식 (8)을 식 (7)에 대입하면 식 (9)와 같다.

$$\dot{v}_{cq} = -\frac{2V_{dc}I_{dc}}{3Cv_{cq}} + \frac{i_q}{C} \quad (9)$$

따라서 식 (5)와 식 (9)에 의해서 비선형방정식으로 표현,

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_q \\ \dot{v}_{cq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} v_{cq} \\ -\frac{2V_{dc}I_{dc}}{3Cv_{cq}} + \frac{i_q}{C} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{v_q}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

단일입력 단일출력의 비선형 시스템은 다음과 같다.

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u \quad (11)$$

$$y = h(x) \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} x_2 \\ -\frac{2V_{dc}I_{dc}}{3Cx_2} + \frac{1}{C} x_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{u}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

여기서, 상태변수는 $x_1 = i_q$, $x_2 = v_{cq}$ 이고 제어입력은 $u = v_q$, 출력은 $y = v_{cq}$ 이다.

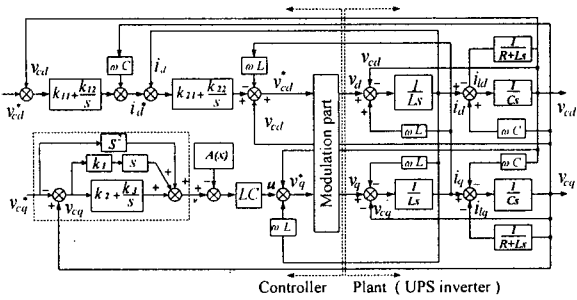


그림 3 인버터의 비선형 제어 블록도
Fig. 3 Nonlinear control block diagram of UPS inverter

3.2 비선형 제어기의 설계

앞에서 출력 y 를 제어입력 u 가 나올 때까지 계속 미분하여 입력과 출력의 선형관계를 유도한다.

$$\dot{y} = \dot{v}_{cq} \quad (14)$$

$$\ddot{y} = -\frac{2V_{dc} \dot{I}_{dc}}{3Cx_2} - \frac{4V_{dc}^2 I_{dc}^2}{9C^2 x_2^3} + \frac{2V_{dc} I_{dc} x_1}{3C^2 x_2^2} - \frac{x_2}{LC} + \frac{u}{LC} \quad (15)$$

여기서 제어입력을 식 (16)과 같이 선정하면

$$u = LC(\ddot{v} - A) \quad (16)$$

식 (15)는

$$A(x) = -\frac{2V_{dc} \dot{I}_{dc}}{3Cx_2} - \frac{4V_{dc}^2 I_{dc}^2}{9C^2 x_2^3} + \frac{2V_{dc} I_{dc} x_1}{3C^2 x_2^2} - \frac{x_2}{LC} \quad (18)$$

선형화된 새로운 제어입력 v 는 다음과 같이 주어진다.

$$v = \ddot{y}_{ref} - k_1 \dot{e} - k_2 e \quad (19)$$

여기에서 $e = y - y_{ref}$, $\dot{e} = \dot{y} - \dot{y}_{ref}$, 그리고 k_1 과 k_2 는 제어기의 이득이다.

식 (19)을 이용하여 출력이 기준치를 추종하기 위한 제어입력 v 의 추종제어를 수행한다. 일반적으로 폐환선형화 기법은 시스템의 정수의 변동에 민감하다. 시스템 정수의 불확실성에 대한 강인한 제어가 요구되기 때문에 적분기를 추가하여 추종제어를 수행한다.

그림 3은 전체 제어블럭도를 나타낸다. q축 성분은 폐환선형화 기법을 적용하여 PWM Inverter의 제어입력전압을 생성한다.

4. 실험결과 및 검토

표 1은 실험에 사용된 파라미터를 나타낸다. 실험에

사용된 배터리는 12 [V], 65 [AH]의 유닛 12개를 직렬로 연결하여 144[V]로 하였다. TMS320c31 프로세서를 탑재한 제어보드를 이용하여 인버터의 제어를 수행하였으며, 제안된 제어기법을 이용하여 R부하에 대해서 실험을 수행하였다. 스위칭소자는 IGBT를 사용하고 스위칭 주파수는 3.5 [KHz]로 하였다.

그림 4는 부하에 인가되는 전압과 부하에 흐르는 전류를 나타내고 그림 5는 (a)부하전압, (b)부하전류의 고조파 스펙트럼을 나타낸다. 3상 평형을 이루고 있으며 고조파 함유율도 허용치 이내임을 보인다. 그림 6은 부하 증가시(저항부하 10[Ω]→20[Ω])의 출력전압을 보인다. 그림 7은 부하감소시의 출력전압의 응답특성을 보인다. 기존의 PI제어와 비교시 제안된 비선형 제어를 이용한 쪽이 더 빠른 응답을 보인다. 그림 8과 9는 부하를 스텝으로 변화시켰을 경우 동기좌표계로 표시한 출력전압과 전류의 과도상태 응답특성을 보인다. 부하의 변화시 전압 제어의 유효성분인 q축 전류의 과도상태 응답특성은 비슷하지만 q축 전압성분의 정상상태 도달시간과 전압의 변동이 PI제어보다 비선형제어가 더 우수함을 보인다.

표 1 인버터 출력필터의 파라미터 및 배터리 사양
Table 1 Parameters of inverter output filter and Battery specification

파라미터	값
L	3 [mH]
C	100 [μF]
Battery Bank	12V 65AH twelve-series

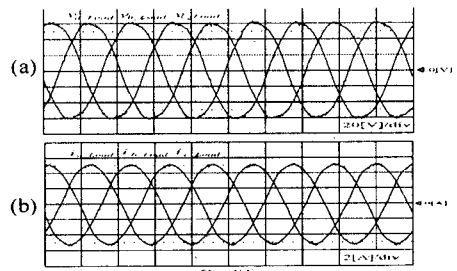


그림 4 UPS (a)출력 전압과 (b)출력 전류
Fig. 4 (a)Output voltage waveform of inverter (b) Output current waveform of inverter

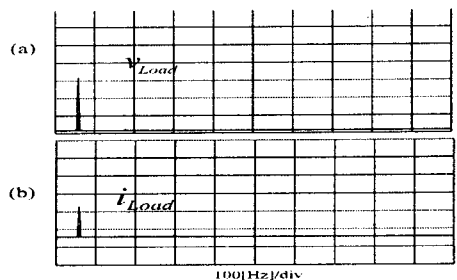


그림 5 고조파 스펙트럼 (a)부하전압(b)부하전류
Fig. 5 A harmonic spectrum (a) load voltage (b) load current

5. 결 론

본 연구에서는 독립형 풍력발전시스템에 사용되는 인버터 시스템 제어에 입출력 변환선형화 기법을 적용하여 제어기를 설계, 일정전압 일정주파수의 3상 출력전압을 얻을 수 있었다. 인버터 출력전압과 출력전류의 주파수 스펙트럼 분석을 통해 THD 특성도 양호하며 R부하의 가변을 통해 제안된 비선형 제어와 PI 제어의 부하변동 시 과도상태 특성 비교를 수행하였다. 부하응답 특성에서도 기존의 PI 제어기 보다 빠른 과도상태 응답특성을 보였다.

향후 제안된 제어기법을 적용하여 R-L부하 및 비선형 부하에 대해서도 실험을 통해 과도상태 및 정상상태에 대한 제어성능의 평가가 이루어져야 한다.

이 논문은 한국과학재단 목적기초연구(R05-2001-000-00936-0) 지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] U.B. Jensen, P.N. Enjeti, and F. Blaabjerg, "A NewSpace Vector Based Control Method for UPS Systems Powering Nonlinear and Unbalanced Loads", IEEE APEC proc., pp. 895-901, 2000.
- [2] H.A. Grundling, E.G. Carati, and J.R. Pinheiro, "Analysis and Implementation of a Modified Robust Model Reference Adaptive Control with Repetitive Controller for UPS Applications", IEEE IECON proc., pp. 391-395, 1998.
- [3] Y. Ito and S. Kawauchi, "Microprocessor-Based Robust Digital DSP for UPS with Three-Phase PWM Inverter", IEEE Trans. on PE, vol. 10, no. 2, pp. 196-204, 1995.
- [4] T. Kawabata et al, "Dead Beat Control Three Phase PWM Inverter", IEEE Trans. on PE, vol. 5, pp. 21-28, 1990.
- [5] Jun-Seok Cho, Seung-Yo Lee, Hyung-Soo Mok, Gyu-Ha Choe, "Analysis and Design of Modified Deadbeat Controller for 3-Phase Uninterruptible Power Supply", IEEE PEDS '99, pp. 1003-1009, 1999.
- [6] Jean-Jacques E. Slotine and Weiping Li, *Applied Nonlinear Control*. Prentice Hall, pp. 207-271, 1991.
- [7] Dong-Choon Lee, "Advanced Nonlinear Control of Three-Phase PWM Rectifiers", IEE proc.- Electr. Power Appl., vol. 147, no. 5, pp. 361-366, 2000.

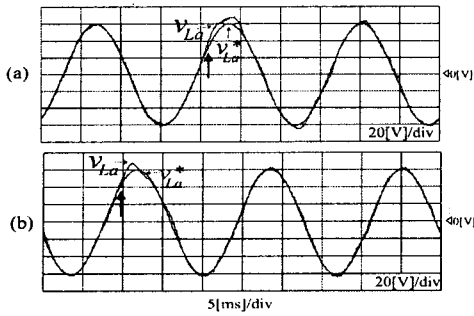


그림 6 부하 증가시 출력전압의 응답

(a) PI제어 (b) 비선형 제어

Fig. 6 Transient response at load increase

(a) PI control (b) nonlinear control

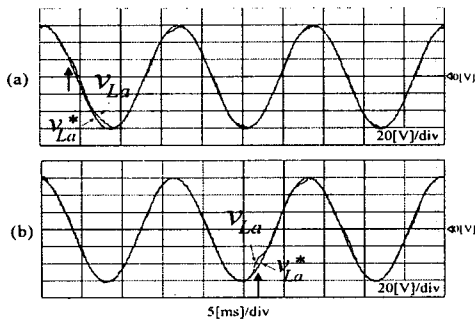


그림 7 부하 감소시 출력전압의 과도응답

(a) PI 제어 (b) 비선형 제어

Fig. 7 Transient response for stepwise load variation

(a) PI control (b) nonlinear

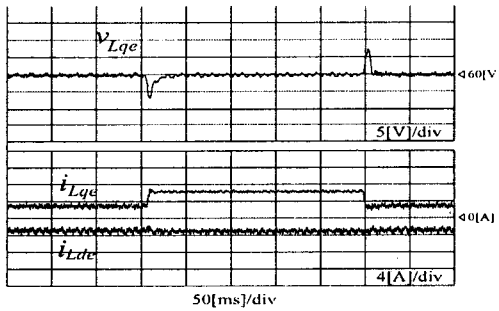


그림 8 부하스텝 변동시 과도응답 (PI제어)

Fig. 8 Step response at load variation of load (PI control)

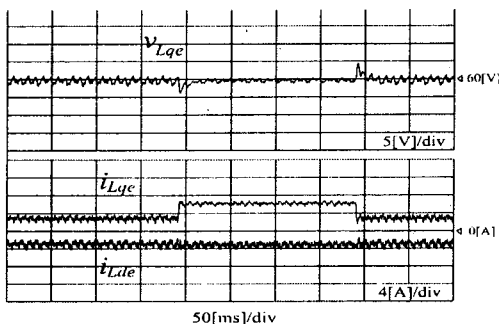


그림 9 부하 스텝 변동 시 과도응답 (비선형 제어)

Fig. 9 Transient response for stepwise load variation (nonlinear control)