

## 직류 대체에너지 활용을 위한 Z-원 인버터 제어

박영산\* · 배철오\* · 남택근\*

\* 목포해양대학교 기관시스템공학부

# The Control of Z-Source Inverter for using DC Renewable Energy

Young San Park\* · Cheri O Bae\* · Taek Kun Nam\*

\* Division of Marine Engineering, Mokpo National Maritime University, Mokpo, 530-729, Korea

**요 약** : 본 논문은 Z-형 컨버터와 수정된 공간벡터 PWM인버터로 구성된 분산전원시스템의 회로모델과 제어 알고리즘을 보여주고 있다. Z-형 컨버터는 수동소자인 L과 C로 간단히 구성되어 있으며 인버터의 상하 양 소자가 동시에 도통되도록 하는 구간을 이용해 승압을 함으로써 기존의 DC/DC 변환기와는 다른 형태를 취하고 있다. 점근 관측기를 이용한 이산시간 슬라이딩모드제어를 통해 전류제어를 함으로써 센서수를 줄이고 제어성능을 개선하였다. 대체에너지로 관심이 많은 태양광이나, 연료전지 그리고 소형 풍력발전으로부터 생산된 직류 에너지를 상용으로 사용할 수 있도록 하는 전력변환기로서 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

**핵심용어** : 대체에너지, 분산전원시스템, 수정된 공간벡터 펄스폭변조, 이산시간 슬라이딩모드제어, 역변환기, 관측기

**ABSTRACT** : This paper presents circuit models and control algorithms of distributed generation system(DGS) which consists of Z-type converter and PWM inverter. Z-type converter which employs both the L and C passive components and shoot-through zero vectors instead of the conventional DC/DC converter in order to step up DC-link voltage. Discrete time sliding mode control with the asymptotic observer is used for current control. This system can be used for power conversion of DC renewable energy.

**KEY WORDS** : Renewable Energy, Distributed Generation System(DGS), MSVPWM(Modified Space Vector Pulse Width Modulation), DSMC(Discrete Sliding Mode Control), Inverter, Observer

### 1. 서 론

대체에너지 개발에 관심을 가지기 시작한 것은 오래 되었으나 충분한 대체에너지가 개발되기까지는 아직도 많은 시간이 소요될 것으로 보인다. 최근 들어 고유가로 인한 여러 가지 사회, 경제적 문제점이 발생하면서 그 어느 때보다 대체에너지 개발에 관심과 지원이 많아짐을 알 수 있다. 지금까지 개발된 대체에너지는 태양광발전, 풍력발전, 연료전지 등을 포함해 여러 종류가 있지만 화석에너지를 대체하기에는 턱없이 부족한 실정이다. 새로운 대체에너지를 개발하고 그 양을 늘리는 것도 중요하지만 이미 개발된 대체에너지를 최대한 활용하는 것 또한 중요한 문제가 아닐 수 없다. 현재까지 개발된 대체에너지를 기존의 에너지와 연계해 함께 사용하는 방법은 이미 태양광발전이나 대형 풍력발전에서 이용되고 있고 바이오 에너지를 화석에너지와 함께 이용하는 방안도 많이 고려되고 있다. 그러나 어느 한 대체에너지를 기존의 에너지와 함께 사용하는 것보다는 여러 대체에너지원을 함께 묶어 복합발전시스템으로 구성하고 함

께 이용이 될 수 있다면 보다 나은 효과를 기대할 수 있을 것이다.

본 논문에서는 중·소규모 분산된 대체에너지들을 함께 이용할 수 있도록 하기위한 간단한 구조의 분산전원시스템(GDS)을 도입하고 기존의 공간벡터 PWM인버터 스위칭 기법을 수정하여 적용하였다. 낮은 전압을 상용의 전압으로 승압하기 위해서는 변압기를 이용하거나 DC/DC 전력변환기와 인버터를 이용하는 방법을 주로 사용하여 왔으나 근래에 와서는 승압과 인버터 스위칭을 함께 이용하는 소형경량의 전력변환기가 많이 연구되고 있다(Peng, 2003; Liu, 2005; Loh, 2005; Vinh, 2005; 박, 2006; 박, 2004). 전류제어기로서는 점근 관측기를 이용한 이산시간 슬라이딩모드제어기(Utkin, 1999)를 도입함으로써 센서수를 줄이고 신뢰성이 우수한 제어기를 구성하고자 하였다.

### 2. DGS 구성

#### 2.1 Z-원 인버터

fig. 1은 전체 DGS의 구성도로 대체에너지원(DC원),

\* 대표저자 : 정희원, seapark@mmu.ac.kr, 061)240-7090

\* 정희원, baeco@mmu.ac.kr, 061)240-7084

\* 정희원, tknam@mmu.ac.kr, 061)240-7310

Dr. Peng(2003)에 의해서 처음 제안된 Z-형 DC/DC 컨버터 그리고 PWM 인버터로 구성되어 있다.

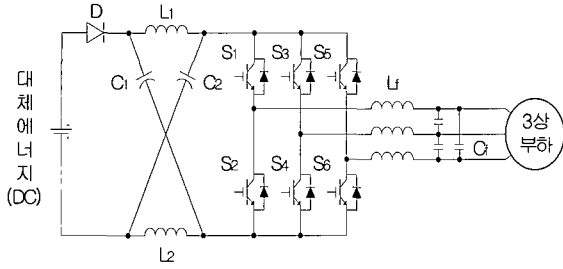


Fig. 1. Total DGS configuration.

## 2.2 수정된 공간벡터 PWM

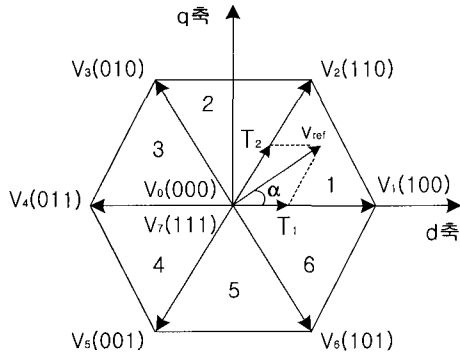


Fig. 2. 6 basic vectors and switching patterns.

인접한 두 기본벡터로부터 시분할에 의해 기본벡터( $v_{ref}$ )를 구하여 dq축 값( $V_d, V_q$ )으로 분리하고  $T_1, T_2$  값을 구하면 식 (1)과 같다.

$$T_1 = \frac{\sqrt{3}T_s}{V_{dc}} \left[ V_d \sin\left(\frac{n}{3}\pi\right) + V_q \cos\left(\frac{n-1}{3}\pi\right) \right]$$

$$T_2 = \frac{\sqrt{3}T_s}{V_{dc}} \left[ V_d \sin\left(\frac{n-1}{3}\pi\right) + V_q \cos\left(\frac{n-1}{3}\pi\right) \right] \quad (1)$$

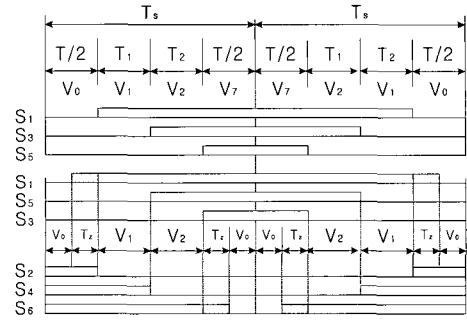
(단,  $0^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$ ,  $n=1 \sim 6$  각 섹터)

$V_1, V_2$  : 인접한 두 기본벡터,  $T_s = T_1 + T_2 + T$

위 식 (1)로부터 SVPWM의  $T_1, T_2, T$  값을 구할 수 있으나 인버터 스위칭에 의해서 출력을 승압시키려면 별도의 상하 스위칭 소자가 동시에 도통되도록 하는 스위칭 시간이 삽입되어야 한다. 그렇게 되면 연산이 복잡해질 뿐 만 아니라 전체적인 효율이 떨어지게 되므로 기존의 인버터 스위칭의 0벡터구간( $T$ )을 이용해 Z형 컨버터에서 승압이 이루어지도록 스위칭 시간을 조절한다(Peng, 2003)(Liu, 2005)(Loh, 2005)(Vinh, 2005)(박, 2006).

Fig. 3은 Z-원 공간벡터 PWM인버터의 수정된 스위칭 패턴을 보여주고 있다. 실제 유효벡터의 크기를 감소시키지 않고

0벡터 구간을 이용해 출력을 승압할 수 있도록 하였다. 따라서 승압을 위한 스위칭 시간은 0벡터 구간( $T$ )에 의해서 제약을 받게 된다.



(a) Sector 1

Fig. 3. Switching input for Z-source inverter.

## 2.2 제어시스템

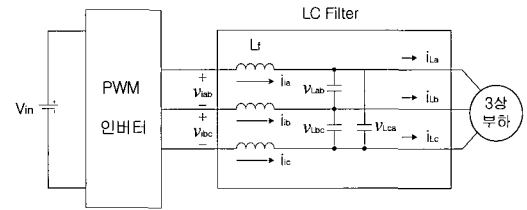


Fig. 4. Simplified system circuit for modeling.

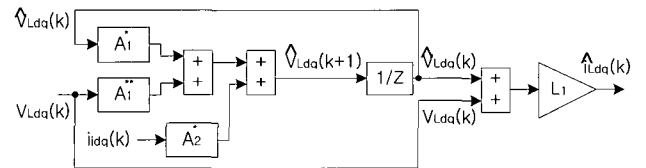


Fig. 5. Block diagram of asymptotic observer.

Fig. 5는 센서수를 줄이고 신뢰성을 향상시키기 위하여 외란인 부하전류( $i_{Ldq}$ )를 추정하는 점근관측기를 보여준다.

Fig. 4와 같은 인버터 출력측의 LC필터와 Fig. 5의 관측기로부터 다음과 같은 전류식을 얻을 수 있다.

$$\frac{d\hat{v}_{Ldq}}{dt} = \frac{1}{3C_f} i - \frac{1}{3C_f} K_1 T_{idq} (\hat{v}_{Ldq} - v_{Ldq}) \quad (2)$$

$$\hat{d}(k) = \hat{i}_{Ldq} = K_1 (\hat{v}_{Ldq} - v_{Ldq})$$

식(2)는 식 (3)과 같이 상태공간 방정식으로 나타낼 수 있다.

Fig. 4로부터  $v_{Ldq}, i_{idq}$ 를 시스템 상태변수( $X$ ), 인버터 출력전압( $v_{idq}$ )을 제어입력( $u$ ), 그리고 부하전류  $\hat{i}_{Ldq}$ 를 외란( $\hat{d}$ )라 하

면 다음과 같은 상태공간 방정식을 유도할 수 있다.

$$\begin{cases} \dot{\hat{X}}(t) = A_1 \hat{X}_1(t) + A_2 X_2(t) - A_1 X_1(t) \\ \hat{d}(t) = \hat{i}_{Ldq} = K_1(\hat{v}_{Ldq} - v_{Ldq}) = K_1(\hat{X}_1 - X_1) \end{cases} \quad (3)$$

여기서  $\hat{X}_1 = \hat{v}_{Ldq}$ ,  $X_2 = i_{idq}$ ,  $X_1 = v_{Ldq}$ ,  $A_1 = -\frac{K_1}{3C_f} T_{idq}$

$$A_2 = \frac{1}{3C_f} I_{2 \times 2}, \quad K_1 = \text{관측기 이득}$$

샘플링주기를  $T_s$ 라 했을 때 식 (3)의 이산시간 형태는

$$\begin{cases} \hat{X}_1(k+1) = A_1^* \hat{X}_1(k) + A_2^* X_2(k) - A_1^{**} X_1(k) \\ \hat{d}(k) = K_1(\hat{X}_1(k) - X_1(k)) \end{cases} \quad (4)$$

$$A_1^* = e^{A_1 T_s}, \quad A_2^* = \int_0^{T_s} e^{A_2(T_s-\tau)} d\tau, \quad A_1^{**} = \int_0^{T_s} e^{A_1(T_s-\tau)} d\tau$$

식 (4)의 관측기로부터 외란( $\hat{d}$ )을 구하여 Fig. 4로부터 유도된 상태방정식에 대입하면 식 (5)와 같이 된다.

$$\begin{aligned} \dot{X}(t) &= AX(t) + Bu(t) + E\hat{d}(t) \\ y(t) &= CX(t) \\ e(t) &= y(t) - y_{ref}(t) \end{aligned} \quad (5)$$

$$X = \begin{bmatrix} v_{Ldq} \\ i_{idq} \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} 0_{2 \times 2} & \frac{1}{3C_f} I_{2 \times 2} \\ -\frac{1}{L_f} I_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0_{2 \times 2} \\ \frac{1}{L_f} I_{2 \times 2} \end{bmatrix},$$

$$E = \begin{bmatrix} -\frac{1}{3C_f} T_{idq} \\ 0_{2 \times 2} \end{bmatrix}, \quad \hat{d} = [\hat{i}_{Ldq}], \quad C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad u = [v_{idq}],$$

$$T_{idq} = [K_s T_i K_s^{-1}], \quad K_s : \text{abc축-dq축 변환계수}$$

식 (5)를 이산시간 형태로 표현하면 식 (6)과 같이 된다.

$$\begin{aligned} X(k+1) &= A^* X(k) + B^* u(k) + E^* \hat{d}(k) \\ y(k) &= CX(k) \\ e(k) &= y(k) - y_{ref}(k) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\text{여기서 } A^* = e^{A T_s}, \quad B^* = \int_0^{T_s} e^{A(T_s-\tau)} B d\tau, \quad E^* = \int_0^{T_s} e^{A(T_s-\tau)} E d\tau$$

출력  $y(k)$ 가  $y_{ref}(k+1)$  값을 추종하게 하기 위해서 다음과 같은 슬라이딩모드 매니폴드를 선택할 수 있다.

$$S(k) = y(k) - y_{ref}(k) = CX(k) - y_{ref}(k) \quad (7)$$

$$\begin{aligned} S(k+1) &= y(k+1) - y_{ref}(k+1) \\ &= CA^* X(k) + CB^* u(k) + CE^* \hat{d}(k) - y_{ref}(k+1) = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

식 (8)의 해로써 제어입력  $u(k)$ 가 설계된다면 이산시간 슬라이딩모드제어가 가능하게 된다(Utkin, 1999). 식 (8)을 만족하는 제어법칙을 등가제어라 하고 다음식과 같이 주어진다.

$$u_{eq}(k) = (CB^*)^{-1}(i_{idq}(k) - CA^* X(k) - CE^* \hat{d}(k)) \quad (9)$$

$u(k)$ 가 다음과 같이 제한된다면  $\|u(k)\| \leq u_0$

식 (10)의 수정된 제어법칙을 적용할 수 있다.

$$u(k) = \begin{cases} u_{eq}(k) & \text{for } \|u_{eq}(k)\| \leq 0 \\ \frac{u_0}{\|u_{eq}(k)\|} u_{eq}(k) & \text{for } \|u_{eq}(k)\| > 0 \end{cases} \quad (10)$$

식 (10)의 이산시간 슬라이딩모드 제어법칙은 유한스텝 후에 도달될 수 있으며  $u_0$ 는 SVPWM 인버터에 의해서 결정된다.

식 (10)의 제어법칙은 유한스텝후에 이산시간 슬라이딩모드에 도달될 수 있으며 무엇보다도 식 (10)는 불연속제어의 직접적용과는 달리 매니폴드  $S(k) = 0$ 에서 채터링없는 동작이 가능하다.

Fig. 6은 전체 제어시스템의 블록도를 보여주고 있다.

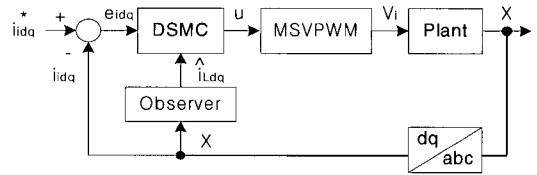


Fig. 6. Block diagram of control system.

### 3. 시뮬레이션 결과 및 고찰

수정된 공간벡터 PWM 기법과 관측기를 이용한 이산시간 슬라이딩모드제어의 유용성을 확인하기 위하여 Matlab/simulink를 이용해 AC208V(L-L)/60Hz/10kVA의 시뮬레이션 테스트 베드를 구성하였다. 사용된 파라미터들은 Table 1과 같다.

Table 1. Parameters of Z-Source DGS

|             |  |
|-------------|--|
| 대체 에너지 출력전압 | $V_{in} = 130 \sim 300$  |
| DC 링크전압     | $V_{c1} = V_{c2} = 340 \text{ V}$                                |
| 정격출력        | $P_{out} = 10 \text{ kVA}$                                       |
| 임피던스 구성요소   | $L_1 = L_2 = 200 \mu\text{H},$<br>$C_1 = C_2 = 1000 \mu\text{F}$ |
| 인버터 출력 필터   | $L_f = 1000 \mu\text{H}, C_f = 200 \mu\text{F}$                  |
| AC출력전압      | $V_{Lrms} = 208 \text{ V(L-L)}$                                  |
| 스위칭/샘플링 주기  | $T_s = 1/(5.4) \text{ kHz}$                                      |

Fig. 7은 관측기에 의해 추정된 부하전류( $i_{la}^*$ )파형과 실제 부하전류( $i_{la}$ )파형을 보여주고 있다. 위 파형은 선형부하, 아래파형은 비선형부하일 경우이며 우수한 추정능력을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 DC입력 130V이고 부하가 10kW 일 때, Fig. 9은 DC입력 300V, 부하 0.5kW 일 때 인버터 및 부하전류, 전압, 콘덴서 전압, 전력 등의 파형을 나타내고 있다. DC 입력전압에 관계없이 Z-원 인버터의 수정된 SVPWM에 의해서 입력 단 전압( $v_{\alpha}$ )이 잘 제어되고 있으며 양호한 평형 3상 교류 출력이 얻어짐을 확인할 수 있다.

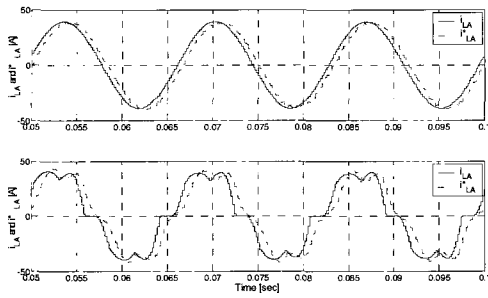


Fig. 7. Estimated load current.

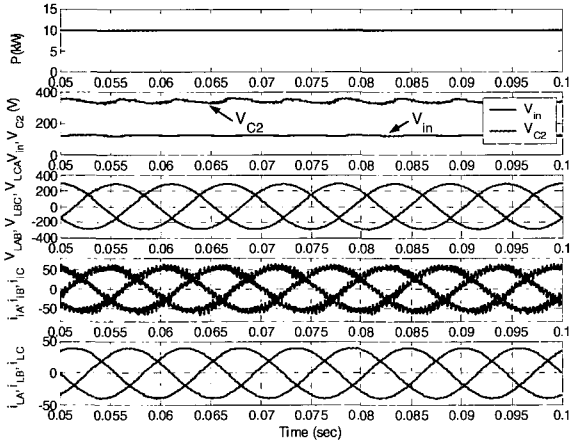


Fig. 8. Simulation results(130V, 10kW).

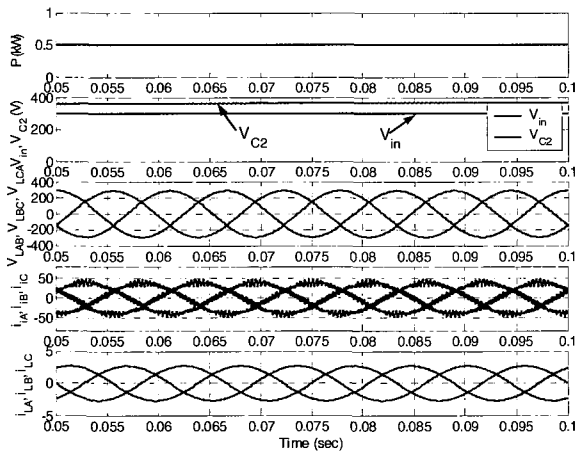


Fig. 9. Simulation results(300V, 0.5kW).

#### 4. 결론

승압을 위해 Z-형 컨버터와 PWM 인버터를 결합하고 기존의 공간벡터 PWM을 수정 이용함으로써 별도의 변압기나 기존의 반도체 전력변환장치 없이 소형 경량의 새로운 DGS를 설계할 수 있었다.

점근 관측기를 사용한 이산시간 슬라이딩모드제어기를 이용함으로써 센서 수를 줄이고 미지부하에 대하여 적은 정상상태 오차와 낮은 왜율을 얻을 수 있었다.

낮은 직류로 출력되는 여러 대체에너지들을 함께 이용해 효율을 높일 수 있으며 출력의 연속성과 용량의 향상을 기대할 수 있을 것이다.

#### 참고 문헌

- [1] Fang Zheng Peng(2003), Z-source inverter, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 39, no. 2, pp. 504-510, Mar/Apr.
- [2] Jingbo Liu, Jingang Hu, Longya Xu(2005), A Modified Space Vector PWM for Z-source Inverter-Modeling and Design, IEEE International Conference on Electrical Machine and Systems, vol. 2, pp. 1242-1247
- [3] P.C. Loh, D. M. Vilathgamuwa, C. J. Gajanayake, Y. R. Lim and D. W. Tao(2005), Transient Modeling and Analysis of Pulse-Width Modulated Z-Source Inverter, IEEE 40th, IAS Annual meeting, Conference on Industry Applications. pp. 2782-2789, Oct.
- [4] T. Q. Vinh, T. W. Chun, J. R. Ahn, H. H. Lee(2005), Algorithms for Controlling Both the DC Boost and AC Output Voltage of the Z-source Inverter, IEEE Annual conference on Industrial Electronics Society, pp. 970-974, Nov.
- [5] 박영산(2006), Z-원 승압인버터를 이용한 변압기 없는 DGS 제어, 한국해양정보통신학회, 제10권, 제9호, pp. 1617-1624
- [6] 박영산(2004), 태양광 및 소단위 풍력발전용 변압기 없는 인버터, 한국해양정보통신학회, 제8권, 제2호, pp. 407-412
- [7] V. Utkin, J. Guldner, and J. Shi(1999), Sliding Mode Control in Electromechanical System, Taylor & Francis, Philadelphia, PA pp. 1-46, pp. 103-113

원고접수일 : 2007 년 2 월 12 일

원고채택일 : 2007 년 6 월 13 일