

# Adaptive Backstepping을 이용한 정현파 전압제어에 관한 연구

김태원, 박태준, 한무호  
포항산업과학연구원(RIST)

## Sinusoidal Voltage Control Method using Adaptive Backstepping Algorithm

Tae-Won Kim, Tae-Joon Park, Mu-Ho Han  
Research Institute of Industrial Science & Technology(RIST)

### ABSTRACT

본 논문은 CVCF 인버터 출력전압을 정현파로 제어하는 기법을 제안한다. 왜곡이 없는 깨끗한 정현파 출력전압을 요구하는 AVR이나 UPS에 적용이 가능하다. 변동 부하나 비선형 부하에 대해서도 출력을 안정되게 제어할 수 있는 장점이 있다. Backstepping 제어 기법을 이용하여 인버터 출력전류를 가상 제어변수로 선정하고 콘덴서 양단전압이 지령값을 추종하도록 가상 제어변수를 조절하고 이를 위해 인버터 출력전압인 입력 제어변수를 조절한다. 출력 필터의 L값의 변동을 고려하여 Adaptive parameter 보상 알고리즘을 적용하여 정밀한 Parameter값을 요구하는 Backstepping 기법의 단점을 보완하였다. 제안한 알고리즘의 타당성을 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

### 1. 서론

기존의 CVCF 인버터의 출력전압 제어는 단순히 Modulation index 조절을 통한 실효율 조절에 그치고 있다. 비선형 부하나 가변부하인 경우 출력전압의 왜곡을 피할 수 없다. 정현파 전압제어를 위해서 기존에는 LC 필터용 콘덴서 전류를 피드백하여 보상하는 알고리즘을 제안하고 있다.<sup>[1,2]</sup> 그러나 콘덴서에 흐르는 전류는 리플이 심해서 제어변수의 항목으로 사용하기에는 부적합하다고 볼 수 있다. 본 논문에서는 콘덴서 전류대신 부하전류와 인버터 출력전류를 이용하고 가상제어변수 개념을 도입하여 콘덴서 양단전압을 정현파로 만들기 위한 Backstepping 제어기법을 제안한다. 한편, LC필터에서 L값이 전류의 크기에 따라 가변되는 비선형성을 보상하기 위해 Adaptive Parameter 추종기법을 제안한다. 이는 파라미터 변동에 강인하게 동작하도록 할 뿐만 아니라 Numeric 오차에 의한 변동에도 강인하게 동작하는 장점을 가진다. 제안된 제어기 성능의 우수성을 시뮬레이션을 통해 검증 하였다.

### 2. 제안된 정현파 전압 제어기

#### 2.1 Backstepping 기법을 이용한 제어기 구성

그림1의 인버터 출력전압  $u$ 를 입력변수로 하고 LC필터의 C 양단전압  $v$ 를 출력변수로 하고 부하전류  $i_L$ 을 외란변수로 했을

때의 Discrete 상태방정식을 구하면 다음 식과 같이 된다.

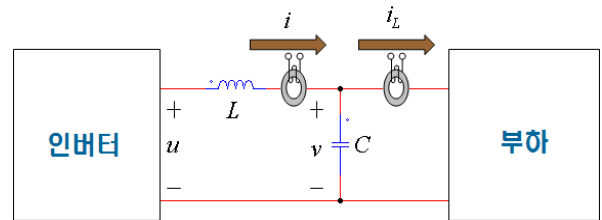


그림 1 인버터 출력 LC필터 및 부하 구성도

$$i(k+1) = \left(1 - \frac{R}{L}T\right)i(k) - \frac{T}{L}v(k) + \frac{T}{L}u(k) \quad \text{식(1)}$$

$$v(k+1) = v(k) - \frac{T}{C}i(k) + \frac{T}{C}i_L(k) \quad \text{식(2)}$$

여기서  $T$ 는 sampling period를 나타낸다. 식(2)에서  $v(k+1)$ 을 zero로 만드는 인버터 출력전류  $i(k)$ 를 가상제어변수로 잡고 이를  $\phi(k)$ 라 하면 다음 식과 같이 된다.

$$\phi(k) = i_L(k) + \frac{C}{T}v(k) \quad \text{식(3)}$$

다음 샘플에서의 가상제어변수는 식(2)를 이용하여 다음식과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \phi(k+1) &= i_L(k+1) + \frac{C}{T}v(k+1) \\ &= i_L(k+1) + i_L(k) - i(k) + \frac{C}{T}v(k) \end{aligned} \quad \text{식(4)}$$

가상제어 변수  $\phi(k)$  와 실제 측정값  $i(k)$ 의 오차를 나타내는 오차항을  $z(k) = i(k) - \phi(k)$ 로 정의하고 다음 샘플에서의 오차항  $z(k+1)$ 을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} z(k+1) &= i(k+1) - \phi(k+1) \\ &= \left(1 - \frac{R}{L}T\right)i(k) - \frac{T}{L}v(k) \\ &\quad + \frac{T}{L}u(k) - \frac{C}{T}v(k) + i(k) - i_L(k) - i_L(k+1) \end{aligned} \quad \text{식(5)}$$

다음 샘플에서의 오차항인 식(5)의  $z(k+1)$ 를 zero로 만드는 입력제어변수  $u(k)$ 를 구하면 다음과 같다.

$$u(k) = \frac{L}{T} \left\{ \left(\frac{R}{L}T - 2\right)i(k) + \left(\frac{T}{L} + \frac{C}{T}\right)v(k) + i_L(k) + i_L(k+1) \right\} \quad \text{식(6)}$$

위식에서  $i_L(k+1)$ 에 대한 정보가 필요한데 이는 샘플 간에 등간격 조건으로부터 다음 식을 통해 구할 수 있다.<sup>[3]</sup>

$$i_L(k+1) = 5/2 i_L(k) - 3/2 i_L(k-1) \quad \text{식(7)}$$

상기 유도과정은 콘덴서 전압  $v(k+1)$ 를 zero로 보내기 위한  $u(k)$ 를 구한 것이고, 실제로는  $v(k+1)$ 를 정현파 전압지령치  $V_m \sin \omega t$ 를 추종하도록 하고 싶다. 따라서 식(6)에서  $v(k)$  대신에  $V_m \sin \omega t - v(k)$ 를 대입하면 원하는 최종 정현파 추종제어기 입력조건을 찾을 수 있게 된다.

### 2.1 Adaptive 기법을 이용한 파라미터 변동 보정

식(1)을 파라미터와 신호의 곱 형태로 표현하면 다음 식과 같다.

$$i(k+1) = \left[ \frac{T}{L} \left( 1 - \frac{R}{L} T \right) \right] [v - u \quad i]^T = \theta \psi^T \quad \text{식(8)}$$

여기서 파라미터 벡터  $\theta = [\alpha \quad \beta] = [T/L \quad (1 - RT/L)]$ 이며, 신호 벡터는  $\psi = [v - u \quad i]$ 이다. Adaptive 추종기법 중 Gradient update 알고리즘을 적용하여 파라미터 추종식을 구하면 다음과 같은 에러와 신호의 곱 형태로 표현된다.<sup>[4]</sup>

$$\dot{\theta} = \Gamma \epsilon \psi^T \quad \text{식(9)}$$

식(9)에서 L값과 직접적으로 관계있는 첫 번째항을 구하면  $\dot{\theta}_1 = \dot{\alpha} = \gamma_1 \epsilon_1 (v - u)$ 로 나타낼 수 있으며,  $\gamma_1$ 은 update상수이고,  $\epsilon_1 = \phi(k) - i(k)$ 이다. 식(9)의 추종식으로 부터 구한 파라미터  $\alpha = T/L$ 를 사용하여 입력 제어변수 식(6)을 다시 표현하면 최종 제어변수 조건을 다음식과 같이 얻을 수 있다.

$$u(k) = \left( R - \frac{2}{\alpha} \right) i(k) + \left( 1 + \frac{C}{T\alpha} \right) (V_m \sin \omega t - v(k)) + \frac{7}{2\alpha} i_L(k) - \frac{3}{2\alpha} i_L(k-1) \quad \text{식(10)}$$

### 3. 시뮬레이션 결과

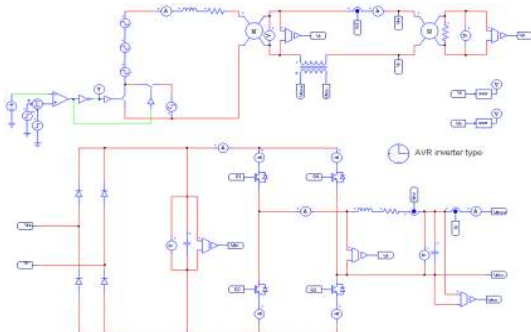


그림 2 직렬전압 보상형 AVR 시스템의 PSIM 모델

본 논문에서 제안된 제어기의 성능과 타당성을 검증하기 위해 PSIM tool을 이용해서 시뮬레이션을 수행하였다. 회로에 사용된 각종 파라미터들은 아래와 같다.

- 1) Utility grid : 1  $\phi$ , 220V(선간전압), 60Hz
- 2) DC link capacitor : 2000uF
- 3) Inverter Filter inductor : 3mH
- 4) Inverter Filter Capacitance : 10uF
- 4) Switching frequency : 50kHz

직렬전압 보상을 통해서 출력전압을 안정화 시키는 AVR 시스템에 본 논문의 제어기를 적용하였다. 고조파 왜곡이 있는 전원 전압 ( $v_s = 300 \sin \omega t + 20 \sin(3\omega t + \pi/36) + 10 \sin(7\omega t + \pi/12)$ ) 조건에서 스텝으로 전원상승과 강하를 시켰을때의 출력전압의 변동을 시

뮬레이션을 통해 확인하였다. 그림3은 전원 강하조건하에서 출력전압이 깨끗한 정현파를 유지하면서 크기도 안정화됨을 볼 수 있다. 그림4는 반대로 상승조건에서의 결과이다. 그림5는 파라미터 변동 보정을 위한  $\alpha$ 값의 변화를 나타낸 것이다.

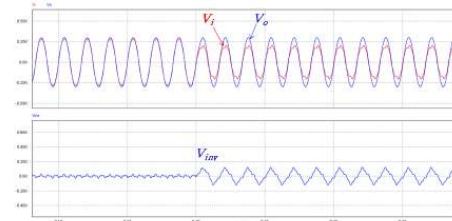


그림 3 전원전압 강하 조건에서의 시뮬레이션 파형

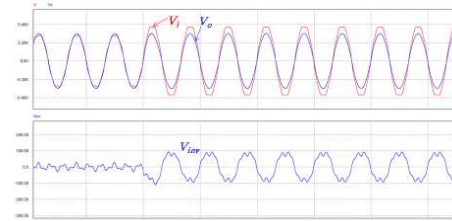


그림 4 전원전압 상승 조건에서 시뮬레이션 파형

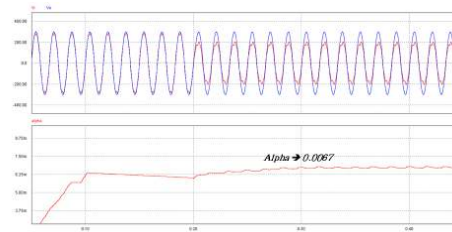


그림 5 파라미터 변동 보정을 위한  $\alpha$ 값의 변화

### 4. 결론

본 논문은 CVCF 인버터 출력전압을 정현파로 제어하는 기법으로 Adaptive Backstepping 알고리즘을 제안한다. 왜곡이 없는 깨끗한 정현파 출력전압을 요구하는 AVR이나 UPS에 적용이 가능하고 변동 부하나 비선형 부하에 대해서도 출력을 안정되게 제어할 수 있는 장점이 있다. 출력 필터의 L값의 변동을 고려하여 Adaptive parameter 보상 알고리즘을 적용하여 정밀한 Parameter값을 요구하는 Backstepping 기법의 단점을 보완하였다. 본 논문에서 제안한 알고리즘의 타당성을 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

### 참고 문헌

- [1] J.M.Guerrero, L.Garcia de Vicuna, J.Miret, J.Matas, M.Castilla, "Integral Control Technique for Single-Phase UPS inverter", ISIE, pp.1043-1048, 2002.
- [2] J.M.Guerrero, L.Garcia de Vicuna, J.Matas, M.Castilla, "Output Impedance Design of Parallel-Connected UPS Inverters With Wireless Load-Sharing Control", IEEE IE., Vol. 52, No. 4, 2005, Aug.
- [3] J.C.Moreno, J.M.Huerta, R.G.Gil, S.A.Gonzalez, "A Robust Predictive Current Control for Three phase Grid Connected Inverters", IEEE IE., Vol. 56, No. 6, 2009.
- [4] P.A.Ioannou, J.Sun, "Robust Adaptive Control", Prentice Hall.