

# 멀티모듈 단상 UPS 시스템의 예측 제어기법

제갈준혁, 최봉연, 박정민, 이택기\*, 원충연  
성균관대학교, 한경대학교\*

## The Predictive Control Method of Multi-Module Single-phase UPS System

Jun Hyeok Jegal, Bong Yeon Choi, Jung Min Park, Taek Kie Lee, Chung Yuen Won  
Sungkyunkwan University, Hankyong National University\*

### ABSTRACT

본 논문에서는 멀티모듈 단상 UPS(Uninterruptible Power Supply) 시스템의 예측 제어기법을 제안한다. 제안한 예측 제어기법은 단상 UPS의 수학적 모델링을 통해 설계되었으며, 전류 예측제어를 통해 모드 전환 시 동특성을 향상시켰다. 제안하는 예측 제어기법은 PSIM 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

### 1. 서 론

정전사고로 인한 피해를 막기 위해 산업용 첨단장비, 의료기기 등 정전 및 전압 변동에 민감한 부하에 안정적인 전원을 공급하는 UPS가 널리 사용되고 있다. UPS 시스템의 경우 단일 모듈로 구성할 시 부하 용량 증가에 따라 UPS를 증설하는데 어려움이 있다. 이를 보완하고자 다수의 단상 UPS를 직렬 또는 병렬로 연결한 모듈형 UPS 시스템이 연구되고 있다.

그림 1은 두 개의 모듈이 병렬로 구성된 UPS 시스템이다. 하나의 마스터 모듈과 하나의 슬레이브 모듈로 구성되어 있으며 마스터 모듈은 전압제어를 통해 마스터 모듈과 슬레이브 모듈의 전류지령을 생성하고 각각의 마스터 및 슬레이브 모듈은 생성된 전류지령을 추종하도록 제어된다. 계통 이상발생 시 빠르게 UPS 모드로 전환이 요구되지만 기존의 전류 제어를 위해 사용되는 PI 제어기의 경우, 모드 전환 시 동특성이 다소 낮아 전류 지령의 추종성이 늦어 부하에 빠른 전력 공급이 어려운 단점이 있다.<sup>[1]</sup>

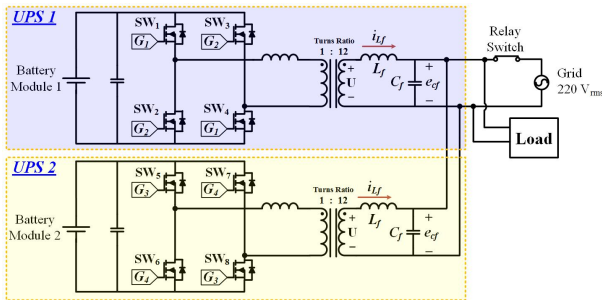


그림 1 병렬 멀티 모듈 UPS 시스템 구성  
Fig. 1 The parallel multi module UPS system configuration

이러한 단점을 보완하고자 본 논문에서는 멀티모듈 단상 UPS 시스템의 동특성 향상을 위한 전류 예측 제어기법을 제안한다. 전류 예측 제어기법은 현재의 출력 전류 값과 다음 제어 주기에 예측되는 전류 값의 오차를 계산하고 이를 0으로 제어하기 위한 스위칭 레퍼런스를 산출한다. 그 결과 마스터 모듈이 산출한 전류지령의 추종성이 높아져 정상상태에 도달하는 시간을 단축시켜 모드 전환에 따른 부하 전압제어의 동특성이 개선된다. 단상 UPS 시스템의 수학적 모델링을 통해 전류 예측 제어기를 설계하였고, 제안된 제어기의 타당성은 PSIM 9.0 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1 시스템 구성

그림 1은 병렬 멀티모듈 단상 UPS 시스템의 구성으로 각각의 UPS 모듈은 절연을 위한 변압기와 단상 풀 브릿지 인버터로 구성되어 있다. UPS 모듈의 배터리는 48 ~ 50[V]이며 출력 전압 220[V<sub>RMS</sub>]의 고승압을 위해 1:12의 턴비를 갖는 변압기를 사용하였다.

#### 2.2 단상 UPS의 모델링을 통한 예측 제어기 설계

제안된 예측 제어기는 각 UPS 모듈의 출력전류에 대한 예측 제어를 수행한다. 단상 UPS 모듈에서 변압기 2차 측 인덕터  $L_f$ 와 커패시터  $C_f$ 를 이용하여 출력 측 유, 무효전류  $i_{Lf,d}$ ,  $i_{Lf,q}$ 와 인버터 출력전압과 부하전압의 관계를 식 (1)로 표현할 수 있다.

단상 UPS의 모델링 된 미분방정식 (1)에서 부하전압  $e_{cf}$  및 출력 전류  $i_{Lf}$ 의 변화율을 제어주기  $T$  동안의  $k+1$ 번째 예측 값과  $k$ 번째 입력에 대한 차로 치환하면 식 (2)의 이산 상태방정식을 계산할 수 있다. 식 (2)에서 단상 인버터는  $k$ 번째 출력 전압을 통해 다음 제어주기에서의 출력 전류값  $i_{Lf}[k+1]$ 을 추정할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{di_{Lf,d}^w}{dt} &= \frac{1}{L_f} U_d^w - \frac{1}{L_f} e_{cf,d}^w + \omega i_{Lf,q}^w \\ \frac{di_{Lf,q}^w}{dt} &= \frac{1}{L_f} U_q^w - \frac{1}{L_f} e_{cf,q}^w - \omega i_{Lf,d}^w \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} i_{L_f,d}^\omega[k+1] - i_{L_f,d}^\omega[k] \\ e_{c_f,d}^\omega[k+1] - e_{c_f,d}^\omega[k] \\ i_{L_f,q}^\omega[k+1] - i_{L_f,q}^\omega[k] \\ e_{c_f,q}^\omega[k+1] - e_{c_f,q}^\omega[k] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L_f} & \omega & 0 \\ \frac{1}{C_f} & -\frac{1}{RC_f} & 0 & \omega \\ -\omega & 0 & 0 & -\frac{1}{L_f} \\ 0 & -\omega & \frac{1}{C_f} & -\frac{1}{RC_f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{L_f,d}^\omega[k] \\ e_{c_f,d}^\omega[k] \\ i_{L_f,q}^\omega[k] \\ e_{c_f,q}^\omega[k] \end{bmatrix} + \frac{1}{L_f} \begin{bmatrix} U_d^\omega[k] \\ 0 \\ U_q^\omega[k] \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$i_{L_f}[k+1] = [1 \ 0 \ j \ 0] \begin{bmatrix} i_{L_f,d}^\omega[k+1] \\ e_{c_f,d}^\omega[k+1] \\ i_{L_f,q}^\omega[k+1] \\ e_{c_f,q}^\omega[k+1] \end{bmatrix}$$

### 2.2.1 비용함수(Cost Function)

본 논문에서 적용되는 예측 제어기의 비용함수  $e$ 는 식 (3)과 같이 마스터 모듈에서 생성된 전류지령  $i_{o,ref}$ 과 측정된 출력전류  $i_{o,scn}$ 의 차로 표현한다. 여기서  $k$ 는  $k$ 번째 제어주기를 의미한다.  $e[k]$ 는  $k$ 번째 제어주기에서의 전류 오차를 의미하며,  $e[k+1]$ 은  $k+1$ 번째 제어주기에서 오차 값을 의미한다.

$$\begin{aligned} e[k] &= i_{o,ref}[k] - i_{o,scn}[k] \\ e[k+1] &= i_{o,ref}[k+1] - i_{o,scn}[k+1] \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)에서  $k+1$ 번째 예측되는 오차를 0으로 줄이기 위해서  $k+1$ 번째 오차와  $k$ 번째 오차의 관계는 식 (4)로 나타낸다.

$$e[k+1] - e[k] = i_{o,ref}[k+1] - i_{o,ref}[k] - (i_{o,scn}[k+1] - i_{o,scn}[k]) \quad (4)$$

식 (4)에서  $k$ 번째와  $k+1$ 번째의 제어주기에서 전류지령의 변화가 없을 시  $k+1$ 번째 예측되는 오차  $e[k+1]$ 를 0으로 만들기 위한 인버터 출력전압은 식 (5)로 계산된다.

$$\begin{aligned} U_d^\omega[k] &= \left(\frac{L_f}{T}\right)e_d[k] + e_{c_f,d}^\omega[k] - L_f\omega i_{L_f,q}^\omega[k] \\ U_q^\omega[k] &= \left(\frac{L_f}{T}\right)e_q[k] + e_{c_f,q}^\omega[k] - L_f\omega i_{L_f,d}^\omega[k] \end{aligned} \quad (5)$$

그림 2는 논문에서 제안하는 예측 전류 제어 블록도를 나타낸다. 전압제어기와 예측제어를 수행하는 전류제어기로 구성되어 있다. 부하 측 전압의 안정적인 제어를 위해 마스터 모듈에서 전압 제어를 수행하며 각 UPS 모듈을 위한 전류 지령을 산출한다. 슬레이브 모듈의 경우 전류제어만을 수행하며 마스터 모듈에서 전달받은 전류 지령을 추종하도록 제어된다. 마스터 모듈에서 생성한 전류 지령에 대한 추종성을 높이기 위해 예측 제어기가 적용되었다. 예측 제어는 식(5)와 같이 현재 출력전압, 출력전류 및 지령과의 오차를 이용하여 인버터의 스위칭 레퍼런스를 산출한다.

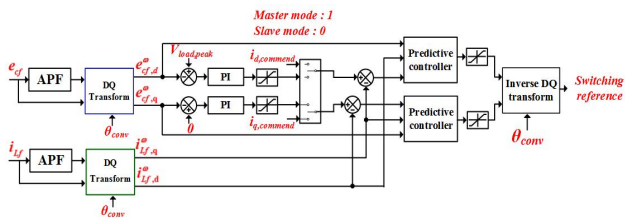


그림 2 제안하는 예측 전류 제어 블록도  
Fig. 2 Proposed predictive current control block diagram

## 2.4 시뮬레이션

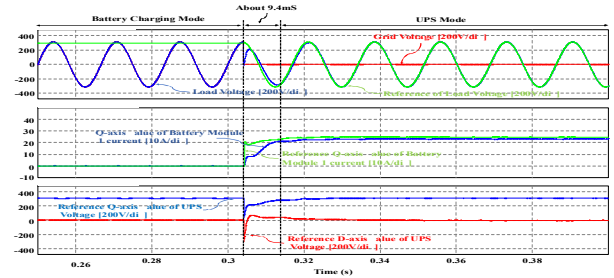


그림 3 PI 제어를 적용한 UPS 시스템의 시뮬레이션 결과 파형  
Fig. 3 Simulation result wave of UPS system applying PI control

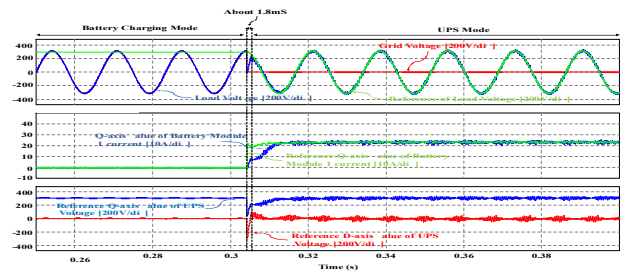


그림 4 예측제어를 적용한 UPS 시스템의 시뮬레이션 결과 파형  
Fig. 4 Simulation result waveform of UPS system applying predictive control

그림 3은 기존 PI 제어를 적용한 시뮬레이션 파형으로 충전모드의 경우  $T=0.3[s]$  부근에서 계통에 문제가 있다고 판단하여 계통을 차단하고 모드 전환 시 전압 추종 시간은 약 9.4ms가 되는 것을 확인할 수 있다. 그림 4는 본 논문에서 제안한 예측 제어를 적용한 단상 UPS 시스템의 시뮬레이션 결과 파형으로 부하가 계통과 차단된 후, 레퍼런스 전압의 추종시간은 약 1.8ms로서 1/4주기 이내에 안정적으로 전압 제어가 되는 것을 확인할 수 있다.

## 3. 결론

본 논문에서는 멀티모듈 단상 UPS 시스템의 예측 제어기법을 제안하였다. 단상 UPS 시스템의 수학적 모델링을 통해 전류 예측 제어기를 설계하였고, PSIM 9.0 시뮬레이션을 통해 모드 전환 시 동특성이 개선되어 1/4주기 이내에 안정적으로 전압 제어가 되는 것을 확인 하였다.

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No.2014R1A2A2A05006744)

## 참고 문헌

[1] K. S. Low and R. Cao, "Model predictive control of parallel connected inverters for uninterruptible power supplies," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 55, no. 8, pp. 2884-2893, Aug. 2008.