

전압원 인버터의 모델 예측 제어에서 스위칭 손실을 줄이기 위한 최적의 제로 벡터 선택 방법

박준철, 곽상신
중양대학교

Optimal Zero Vector Selecting Method to Reduce Switching Loss on Model Predictive Control of VSI

Jun Cheol Park, Sangshin Kwak

School of Electrical and Electronics Engineering, Chung-ang University

ABSTRACT

본 논문은 전압원 인버터를 모델 예측 제어 (Model Predictive Control)를 하는데 있어 스위칭 손실을 줄이기 위한 제로 벡터 (zero vector) 선택 방법을 제안한다.

기존의 전압원 인버터의 모델 예측 제어는 제로 벡터의 중복을 선택하는 방법이 제시되지 않아, 이에 대한 연구가 필요하다. 본 논문에서는 제로 벡터의 중복을 선택하는 방법으로 스위칭 손실을 줄이기 위한 제로 시퀀스 전압을 생성하고, 생성된 제로 시퀀스 전압의 부호를 통해 제로 벡터의 중복을 선택하였다. 따라서 전류의 품질은 그대로 유지시키는 동시에 스위칭 손실을 감소시킬 수 있다. 이를 시뮬레이션으로 검증하였다.

1. 서론

인버터의 모델 예측 제어는 기존의 PI 제어를 이용한 SPWM (Sinusoidal Pulse Width Modulation) 또는 SVPWM (Space Vector Modulation)을 사용한 방법보다 빠른 응답특성을 가지며, 모듈레이터 (Modulator)를 필요로 하지 않아 간단하다는 장점을 가지고 있다. 따라서 마이크로프로세서의 발전과 함께 모델 예측 제어에 대한 활발한 연구가 이루어져 왔다.

모델 예측 제어는 모듈레이터를 대신해 비용 함수 (Cost Function)를 통해 미래 지령 전류와 미래 출력 전류간의 에러를 최소화하는 스위칭 상태를 결정한다. 또한 모델 예측 제어는 비용 함수에 미래 지령 전류와 미래 출력 전류간의 에러 이외에 다양한 제어 변수를 포함하여 제어를 할 수 있는 장점을 가지고 있다.^[1]

모델 예측 제어의 비용 함수에서 인버터의 제로 벡터 (V_0 , V_7)는 그림 1.과 같이 스위칭 상태는 다르지만, 0이라는 같은 전압 상태를 만들어 제로 벡터의 중복에 대한 구분을 할 수 있는 제어 알고리즘이 필요하다.

본 논문에서는 2 레벨 전압원 인버터를 모델 예측 제어하는데 있어, 인버터의 제로 벡터의 중복을 선택하는 방법을 제안한다. 제안한 제로 벡터 선택 알고리즘은 제로 벡터의 스위칭 상태만을 결정하기 때문에 기존의 모델 예측 제어와 동일한 전류 품질을 가지고 있다. 또한 스위칭 손실을 줄이기 위한 제로 시퀀스 전압의 부호를 통해 결정하기 때문에 인버터의 효율을 향상시킬 수 있는 장점이 있다.

제안하는 제로 벡터 선택의 알고리즘은 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

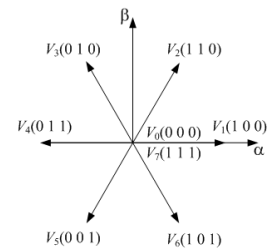


그림 1. 3상 2-레벨 인버터의 공간 벡터
Fig. 1 Space Vector of Three-phase 2-level inverter

2. 제안하는 제로 벡터 선택 알고리즘

2.1 2-레벨 인버터의 모델 예측 제어

그림 2.는 2 레벨 전압원 인버터의 시스템을 나타낸다. 인버터의 모델 예측 제어를 위해 인버터의 모델과 부하 모델이 필요하다.

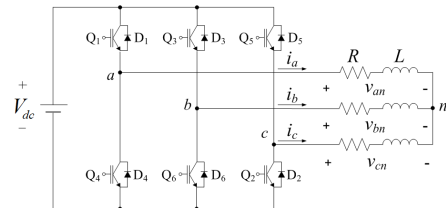


그림 2. 3상 2-레벨 인버터
Fig. 2 Three-phase 2-level inverter

그림 2.의 2 레벨 전압원 인버터의 부하 모델을 세우면 다음과 같다.

$$v = Ri + L \frac{di}{dt} \quad (1)$$

식 (1)의 인덕터에 걸리는 전압에서 전류의 미분형태를 오일러 방법을 통해 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{di}{dt} = \frac{i(k+1) - i(k)}{T_{sp}} \quad (2)$$

식 (2)을 인버터의 부하 모델의 식 (1)에 대입하여 전개하면, 다음과 같다.

$$i(k+1) = i(k) + \frac{T_{sp}}{L} (v(k) - Ri(k)) \quad (3)$$

식 (3)를 통해서 알 수 있듯이, 현재상태의 전류와 현재상태

의 스위칭 상태를 통해 미래 전류를 예측 할 수 있다.

식 (4)는 다음과 같은 비용함수를 통해 미래 지령 전류와 현재 전류간의 에러를 최소로 하는 스위칭 상태를 결정할 수 있게 된다.

$$g = |i_{\alpha}^*(k+1) - i_{\alpha}(k+1)| + |i_{\beta}^*(k+1) - i_{\beta}(k+1)| \quad (4)$$

2.2 제로 벡터 선택 알고리즘

2 레벨 인버터의 제로 벡터는 같은 상전압을 나타내기 때문에, 식 (4)와 같은 비용함수를 통해서도 제로 벡터의 선택을 결정할 수 없다.

따라서 비용 함수를 통해 제로 벡터가 선택되었을 때는 추가적으로 제로 벡터 V_0 와 V_7 중 스위칭 상태를 결정할 수 있는 알고리즘이 필요하다.

2.2.1 제로 시퀀스 전압 생성

비용 함수를 통해 V_0 와 V_7 가 선택되었을 때, 이 두 스위칭 상태 중 사용할 하나의 스위칭 상태를 결정해 주기 위해 제로 시퀀스 전압을 생성한다.

식 (5)를 인버터의 출력 상전압에 대해서 정리하면 다음과 같다.

$$v(k) = Ri(k) + \frac{L}{T_{sp}}(i(k+1) - i(k)) \quad (5)$$

식 (5)을 한 샘플링 주기만큼 이동 시키면 다음과 같다.

$$v(k+1) = Ri(k+1) + \frac{L}{T_{sp}}(i(k+2) - i(k+1)) \quad (6)$$

식 (6)에서 미래 부하전류 $i(k+2)$ 와 $i(k+1)$ 를 미래 지령 전류 값으로 바꾸면 인버터의 미래 출력 상전압 벡터의 지령 값을 얻을 수 있고, 이렇게 얻은 미래 출력 상전압 벡터의 지령 값을 alpha beta/abc 트랜스포메이션을 통해 각 상의 미래 출력 상전압의 지령 값을 얻을 수 있다.

식 (6)에서 얻은 미래 출력 상전압 벡터를 식 (7)과 같이 최대값과 최소값을 고르고 중간값을 제외시킨다.

$$V_{\max} = \max(v_{an}, v_{bn}, v_{cn}), V_{\min} = \min(v_{an}, v_{bn}, v_{cn}) \quad (7)$$

그 다음, 식 (7)의 V_{\max} , V_{\min} 에 대응되는 상의 전류를 식 (8)과 같이 고른다.

$$i_{\max} = i_{V_{\max}}, i_{\min} = i_{V_{\min}} \quad (8)$$

식 (8)의 전류 i_{\max} 와 i_{\min} 의 절대값을 비교하고 i_{\max} 의 절대값이 i_{\min} 보다 클 경우 식 (9)와 같이 제로 시퀀스 전압을 만든다.

$$v_{zsv} = \frac{V_{dc}}{2} - V_{\max} \quad (9)$$

식 (8)의 전류 i_{\max} 와 i_{\min} 의 절대값을 비교하고 i_{\min} 의 절대값이 i_{\max} 보다 클 경우 식 (10)과 같이 제로 시퀀스 전압을 만든다.

$$v_{zsv} = -\frac{V_{dc}}{2} - V_{\min} \quad (10)$$

위와 같은 방법으로 미래 출력 상전압의 지령 값과 미래 전류 지령 값으로 식 (9)와 (10)을 통해서 제로 시퀀스 전압을 얻을 수 있다.^[2]

2.2.1 제로 벡터 선택의 결정

2.2.1절에서 생성한 제로 시퀀스 전압을 통해 제로 벡터의 선택이 가능하다. 제로 시퀀스 전압의 부호가 양일 경우에는 제로 벡터 V_7 (1, 1, 1)을 선택하고, 제로 시퀀스 전압의 부호가

음일 경우에는 V_0 (0, 0, 0)을 선택함으로써 제로 벡터의 선택이 가능하다.

3. 시뮬레이션

제안한 알고리즘의 동작을 검증하기 위해 Psim을 기반으로 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 시스템의 파라미터는 $V_{dc} = 200$ V, $R = 2$ Ω, $L = 10$ mH, $T_{sp} = 50$ μs 이고, 미래 지령 전류의 피크 값과 주파수는 각각 10 A, 60 Hz이다. 이 때, 샘플링 주기 T_{sp} 는 50μs로 시뮬레이션을 수행하였다.

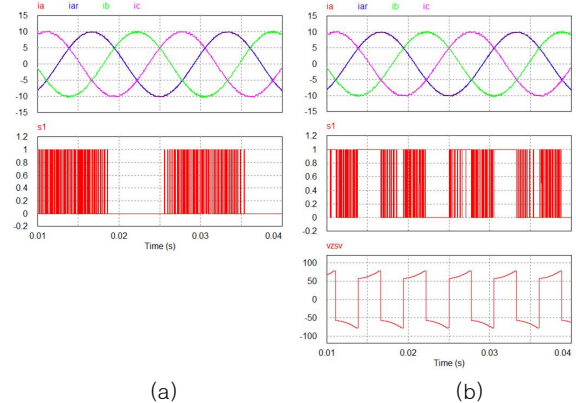


그림 3. 시뮬레이션 결과 : 출력 전류, A상 스위칭 신호 및 제로 시퀀스 전압 (a) 기존 방법 (b) 제안한 방법

Fig. 3 Simulation results : output current, A-phase switching signal and zero sequence voltage (a) conventional method (b) proposed method

그림 3은 기존 방법과 제안한 방법의 시뮬레이션 결과 파형이다. 전류파형은 동일하나 제안한 방법은 제로 벡터의 선택으로 인해 전류크기에 따라 스위칭 신호가 달라짐을 보인다.

4. 결론

본 논문에서는 2 레벨 전압원 인버터의 모델 예측 제어에서 제로 벡터 선택 알고리즘에 대해서 제안하였다. 제안한 알고리즘은 기존의 모델 예측 제어와 동일한 전류 품질을 가지고 있으며, 제로 벡터의 선택으로 인해 스위칭 손실을 줄일 수 있는 장점을 가지고 있다. 이를 시뮬레이션으로 검증하였다.

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원 (2014R1A2A2A01006684) 및 2012년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원(No.20124030200060)을 받아 수행한 연구임.

참고 문헌

- [1] Rodriguez, J.; Pontt, J.; Silva, C.A.; Correa, P.; Lezana, P.; Cortes, P.; Ammann, U., "Predictive Current Control of a Voltage Source Inverter," IEEE Trans. Ind. Electron., vol.54, no.1, pp.495,503, Feb. 2007
- [2] D. Chung and S. Sul, "Minimum loss strategy for three phase PWM rectifier," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 46, no. 3, pp. 517 526, Jun. 1999.