

예측전류제어를 적용한 IPMSM 구동 시스템의 스위치 온도에 대한 연구

장영희¹, 원일권¹, 김도윤¹, 황준하¹, 원충연¹
 성균관대학교¹

The Study on Switch Temperature of IPMSM Driving System using Predictive Current Control

Young Hee Jang¹, Il Kwon Won¹, Do Yun Kim¹, Jun Ha Hwang¹, Chung Yuen Won¹
 Sungkyunkwan University¹

ABSTRACT

본 논문은 벡터제어 기반의 IPMSM 구동 시스템에서 순시 토크 제어 시 전류제어기법에 따른 스위치의 온도특성에 대하여 기술하였다. 전류제어 기법으로는 예측전류제어기법과 기존의 PI(Proportional Integral) 제어기 기반의 SVPWM을 각각 적용하였고, 순시 토크 제어에 따른 스위치 발열량을 비교 분석하였다.

1. 서론

IPMSM 제어를 하는데 있어서 3상 전압형 인버터(2 Level Inverter)가 가장 많이 사용되며, 3상 출력전류를 제어함으로써 전동기의 순시 토크제어가 가능하다. 전류제어기법으로는 기존의 PI제어 기반의 SVPWM 전류제어기법과 현재 연구가 활발히 진행되고 있는 예측전류기법을 각각 적용하였다. 예측전류제어기법은 마이크로프로세서의 연산 속도가 빨라지면서 연구가 활발히 진행되고 있는 제어기법으로서, 부하의 모델링을 통해 예측전류지령을 구한다. 이를 제어에 이용하는 방식이기 때문에 동특성이 빠르다는 장점이 있고, 샘플링 주파수가 높을수록 예측 값은 정확해진다. 하지만 샘플링 주파수에 따라 스위칭 주파수도 달라진다는 단점이 있고, 부하 모델링이 정확해야 한다는 단점이 있다. 본 논문에서는 순시토크 제어를 위해 PI 기반의 SVPWM 전류제어기법을 적용하였을 경우와 예측전류제어기법을 적용하였을 경우에 대한 스위치 온도특성에 대하여 비교 분석 하였다.

2. 3상 인버터의 예측전류제어기법

2.1 비용함수(Cost Function)

3상 인버터에서의 예측전류제어기법은 일정 제어주기마다 전류를 측정하여 다음 주기에서의 스위칭 상태에 따른 전류를 예측하고 식 (1)을 통해 지령 값과 예측 값이 최소가 되도록 하는 스위칭 상태를 출력한다.^[1]

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

2.2 예측전류(Predictive Current)

예측 전류는 현재의 전류 값과 부하의 L,R성분 그리고 부하에 인가되는 전압을 알고 있다면 식 (2)를 통해 구할 수 있다.

$$i^p(k+1) = (1 - \frac{RT_s}{L})i(k) + \frac{T_s}{L}(v(k) - e(k)) \quad (2)$$

여기서, 샘플링 주파수가 역기전력의 주파수보다 훨씬 크다면 $e(k) = e(k-1)$ 이고, $e(k-1)$ 은 식(3)을 통해서 구할 수 있다.

$$e(k-1) = v(k-1) - \frac{L}{T_s}i(k) - (R - \frac{L}{T_s})i(k-1) \quad (3)$$

2.3 동작 원리(Working Principle)

샘플링 주기마다 현재의 전류를 측정하고, 역기전력을 추정하여 식 (2)를 통해 스위칭 상태에 따른 예측전류가 구해진다.

예측된 전류와 지령전류의 차가 최소가 되도록 하는 스위칭 상태가 출력되어야 함으로 식 (1)이 사용되고, 비용함수의 값이 최소가 되었을 때의 스위칭 상태가 출력된다.

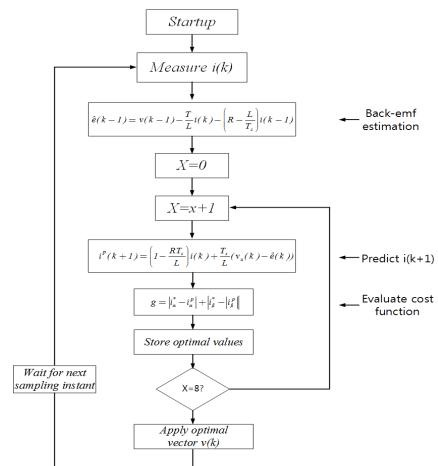


그림.1. 예측전류제어 플로우 차트
 Fig. 1. Flow diagram of the predictive current control

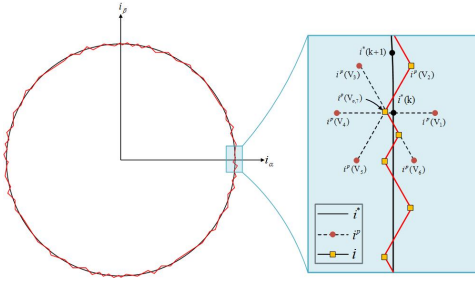


그림 2. 지령전류 및 예측전류의 공간 벡터
Fig 2. Space Vector of reference & predictive current

3. 소자 열 모델링

스위치에서 발생하는 열은 스위치 내부의 P,N 접합면 (Junction)에서 발생하고, 이 열은 내부 구성물질을 지나 Base Plate를 통해 방열판(Heatsink)으로 전달되고, 최종적으로 공기 중으로 전달된다. 이러한 열전달 과정에서 열의 전달을 방해하는 저항성분을 열 저항이라고 한다.

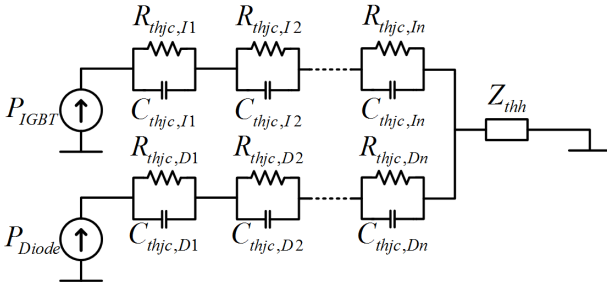


그림 3. 열 저항성분을 모델링한 전기회로
Fig 3. Modeling circuit of thermal resistance

열 저항 성분은 그림 3과 같이 전기회로로 모델링 할 수 있고, 열 저항 성분은 사용하고자 하는 소자의 데이터 시트에 기재 되어있으며, 본 논문에서는 FS800R07A2E3을 사용 하였다. 열 저항 곡선은 시정수 곡선 형태로 되어있고, 데이터시트에는 시정수에 따른 저항 성분과 시간이 표기되어있다. 이 때 소자의 열 저항 시정수 시간과 저항 값 그리고 커패시터 값을 식 (4)를 통해서 계산할 수 있다.

$$\tau_n = R_{thjn} C_{thjn} \quad (4)$$

$$C_{thjn} = \frac{\tau_n}{R_{thjn}}$$

4. 시물 레이션

그림 4는 예측제어기법을 적용하여 전류를 제어 하였을 때의 시물레이션으로 Cost함수의 출력에 따라 전압벡터가 출력되는 것을 볼 수 있고, 일정 구간에서 전압벡터가 유지되는 것을 볼 수 있다. 이에 따라 그림 5, 6과 같이 출력 상전류의 리플은 PI제어 기반의 SVPWM에 비해 예측전류제어 더 크다는 것을 볼 수 있다. 하지만 예측전류제어기법은 스위칭을 덜 하는 구간이 존재함으로 그림 7과 같이 스위치의 온도는 모든 구간에서 낮다는 것을 볼 수 있고, 최대 20℃ 만큼 차이가 나는 것을 볼 수 있다.

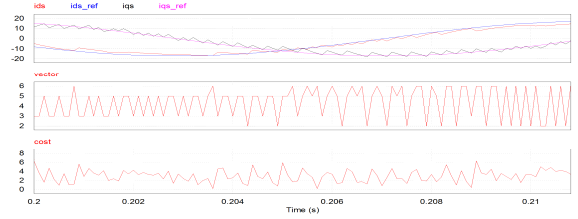


그림 4. 예측전류제어기법에서의 지령 전류 및 실제 전류
Fig 4. Reference & real current in predictive current control

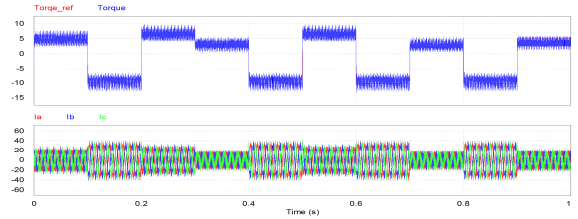


그림 5. 예측전류제어기법을 적용 하였을 때의 출력 토크 및 상전류
Fig 5. Out torque & phase current as applying the predictive control

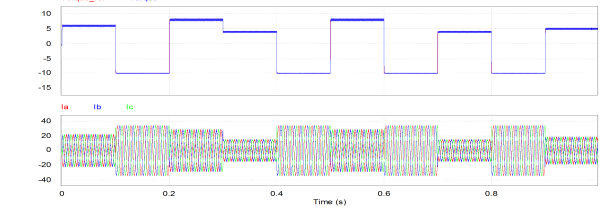


그림6. PI전류제어기법을 적용 하였을 때의 출력 토크 및 상전류
Fig6. Output torque & phase current as applying the PI control

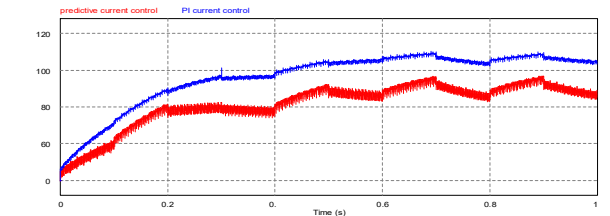


그림 7. PI와 예측 전류제어기의 스위치 온도
Fig 7. Switch temperature as applying PI & predictive control

4. 결론

본 논문은 벡터제어 기반의 IPMSM 구동 시스템에서 스위치의 온도특성을 제어기법에 따라 비교하였다. 스위치의 열모델링을 통해 예측전류제어기법과 SVPWM 기법에서의 스위치 온도 차이를 확인하였으며, 예측 전류제어기법의 가변 스위칭 동작에 따른 스위칭 손실 저감을 예상할 수 있다.

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

[1] Jose Rodriguez, Jorge Pontt, César A. Silva, Pablo Correa, Pablo Lezana, Patricio Cortes, "Predictive Current Control of a Voltage Source Inverter," IEEE Trans., Vol. 54, No. 1, Feb. 2007.