

단상 다이오드 정류기와 소용량 직류단 캐패시터를 가지는 전동기 구동 시스템에서 직류단 전압을 높이기 위한 고조파 주입법

채영호, 하정익
서울대학교 전기정보공학부

Harmonic Injection Method for Increasing DC-link Voltage in Drive Systems with Single-Phase Diode Rectifier and Small DC-link Capacitor

Young-Ho Chae and Jung-Ik Ha
School of Electrical and Computer Engineering, Seoul National University

ABSTRACT

본 논문에서는 단상 다이오드 정류기와 소용량 직류단 캐패시터를 가지는 전동기 구동 시스템에서 계통 전류에 최소 고조파 전류 주입을 통하여 직류단 전압을 높이는 방법을 제안한다. 소용량 직류단 캐패시터를 가지는 전동기 구동 시스템은 직류단 전압이 맥동하게 되는데 직류단 전압이 낮은 부분에서는 과도한 약자속 전류가 필요하게 된다. 기존의 연구에서는 직류단 전압을 확보하기 위해 직류단 최소 전압을 설정하는 방법이 제안되었다. 하지만 계통 전류의 고조파 규정 때문에 직류단 최소 전압을 높이는 것은 한계가 있다. 제안된 방법에서는 계통 전류에 고조파를 주입함으로써 기존의 한계보다 더 높은 직류단 최소 전압을 가지면서도 계통 전류의 고조파 규정을 만족시킬 수 있도록 한다. 제안된 방법은 시뮬레이션을 통해 그 타당성을 검증한다.

1. 서론

일반적으로 사용되는 계통 연계형 전동기 구동 시스템에서는 안정적인 직류단 전압을 확보하기 위해 직류단 캐패시터로 대용량의 전해 캐패시터가 사용된다. 하지만 대용량의 전해 캐패시터 사용으로 시스템의 부피 증대 및 신뢰성 하락, 계통 전류의 고조파 왜곡 등의 문제를 가진다. 따라서 전해 캐패시터를 대체하기 위한 연구로 소용량 직류단 캐패시터를 가지는 전동기 구동 시스템이 연구되어왔다. 소용량 직류단 캐패시터 시스템 중 가전제품에 많이 사용되는 단상 계통 전동기 구동시스템은 전해 캐패시터 시스템이 가지는 문제를 보완하는 장점을 갖지만 직류단 전압이 계통 전압을 따라 맥동하기 때문에 안정적인 직류단 전압을 확보할 수 없다. 따라서 소용량 캐패시터 시스템은 직류단 전압이 낮은 부분에서 과도한 약자속 전류가 필요해지는 단점을 가진다. 이를 해결하기 위해 기존의 연구에서는 직류단 최소 전압을 설정하는 방법이 제안되었다.^[1] 하지만 직류단 최소 전압을 설정하게 되면 계통 전류가 왜곡되는데 계통전류의 고조파 규정이 있어 직류단 최소 전압을 높이는데 한계가 있다.

본 논문에서는 계통 전류에 고조파를 주입함으로써 계통 전류의 고조파 성분을 바꾸어 더 높은 직류단 최소 전압에서도 계통 전류의 고조파 규정을 만족시키도록 한다. 주입되는 고조파는 계통전류의 역률을 고려하여 수치해석을 통해 계산된 최소한의 고조파 전류가 주입되도록 한다. 제안된 방법은 MATLAB 시뮬레이션을 통해 검증한다.

2. 제안된 방법

2.1 기존의 연구

2.1.1 직류단 최소 전압

소용량 직류단 캐패시터 시스템은 그림 1의 (a)에서 $V_{dc.min}$ 이 0V인 그래프와 같이 계통 전압을 따라 맥동하는 직류단 전압을 갖는다. 따라서 그림 (b)에서 볼 수 있듯 계통 전류가 정현파의 형태를 갖게 되어 기존의 전해 캐패시터 시스템에서 문제가 되었던 계통 전류의 고조파 왜곡 문제를 해결할 수 있는 특징을 가진다. 하지만 직류단 전압이 낮은 부분이 존재하여 전동기 구동에 필요한 전압을 확보할 수 없는 단점이 있다. 이를 해결하고자 기존의 연구에서 제안된 직류단 최소 전압 설정법은 그림 1의 (a)에서 $V_{dc.min}$ 이 150V인 그래프와 같이 직류단 전압이 낮은 부분에서 직류단 전압을 설정된 최소 전압으로 제어하는 것을 말한다. 직류단 전압을 상승하게 되면 계통 전압과 직류단 전압의 차이로 인해 다이오드가 도통되지 않는 구간이 발생하게 되고 그림 (b)와 같이 계통 전류의 고조파 왜곡을 야기한다.

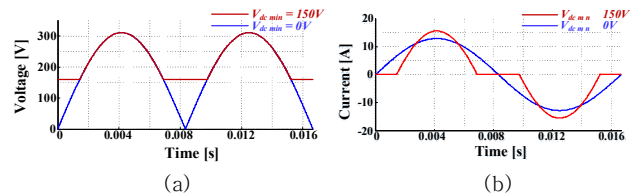


그림 1 (a) 직류단 전압 (b) 계통 전류

2.1.2 기존 시스템의 한계

계통 전류는 IEC61000-3-12와 같은 계통 전류 고조파 규정을 만족시켜야 하는데 직류단 최소 전압을 높게 설정할수록 다이오드의 도통 구간이 짧아지기 때문에 계통 전류의 왜곡이 더욱더 심해져 임계 직류단 최소 전압 이상에서는 고조파 규정을 만족시킬 수 없게 된다. 그림 2는 고속 푸리에 변환을 통한 계통 전류의 고조파 성분과 계통 전류의 고조파 규정치를 비교하여 시스템의 고조파 규정 만족 여부를 분석한 그래프이다. 그림 2의 (a)와 (b)를 통해 기존 시스템의 임계 직류단 최소 전압은 149V이며 이 때 계통 전류의 고조파 규정은 IEC61000-3-12를 기준으로 한다. 그림 2의 (b)에서 알 수 있듯 계통 전류의 고조파 성분 중 제 3고조파에 의해 계통 전류의 고조파 규정이 위배되는 것을 확인 할 수 있으며 제 5고조파, 제 7고조파 등 다른 차수의 고조파 성분은 규정치에 비해 비교적 여유가 있음을 알 수 있다. 따라서 계통 전류의 고조파 성분을 조정할 수 있다면 더 높은 직류단 최소 전압에서도 고조파 규정을 만족시킬 수 있게 된다.

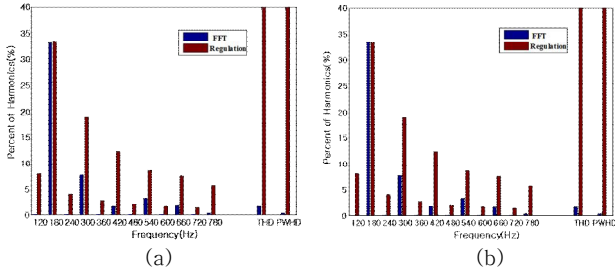


그림 2 기존 시스템의 계통 전류 고조파 분석 (a) $V_{dc.min}=149V$ (b) $V_{dc.min}=150V$

2.2 고조파 주입법

2.2.1 고조파 크기 함수

본 논문에서는 계통 전류에 고조파를 주입하여 계통 전류의 고조파 성분을 조정함으로써 더 높은 직류단 최소 전압을 가짐과 동시에 계통 전류의 고조파 규정을 만족시킬 수 있도록 한다. 먼저 계통 전류의 고조파 분석을 위한 기본적인 푸리에 급수 식은 다음과 같다.

$$F(n) = a_0 + \sum (a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)) \quad (1)$$

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad a_n = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) \cdot \cos(n\omega t) dt \quad b_n = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) \cdot \sin(n\omega t) dt$$

위의 식에서 $f(t)$ 는 주입하는 고조파 전류를 의미하며 이 때 주입되는 전류들은 기함수이므로 a_0 와 a_n 은 0이 된다. 따라서 식 (1)에서 계통 전류는 b_n 을 계수로 갖는 n 차 고조파 성분의 합으로 나타나게 되며 이 때 b_n 은 n 차 고조파 성분의 크기를 나타낸다. 주입하는 고조파 전류와 b_n 에 대하여 식을 풀어보면 다음과 같다.

$$f(t) = I_m \sin(m\omega t)$$

$$b_n = \sum_m \frac{4}{T} I_m \alpha \int_{t_1}^{T-t_1} \sin(m\omega t) \cdot \sin(n\omega t) dt = \sum_m I_m b_m'$$

$$b_m' = \begin{cases} b_{n,n}' = b_{n,n}' = \frac{4}{T} \alpha \left(\frac{1}{2} (T - 2\omega t) + \frac{1}{2m} \sin(2m\omega t_1) - \frac{km}{m} (2 \cos(m\omega t_1)) \right) & \text{if } m = n \\ b_{m,n}' = \frac{4}{T} \alpha \left(\frac{1}{m+n} \sin((m+n)\omega t_1) - \frac{1}{m-n} \sin((m-n)\omega t_1) - \frac{2k_m}{n} \cos(n\omega t_1) \right) & \text{if } m \neq n \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{where } t_1 = \frac{1}{\omega} \sin^{-1} \left(\frac{V_{dc.min}}{V_{s,max}} \right)$$

식 (2)에서 I_m 은 주입하는 고조파 전류의 크기를 나타내며 T , α , $V_{dc.min}$, $V_{s,max}$ 는 각각 함수의 주기, RMS값 보상을 위한 상수, 직류단 최소 전압, 계통 전류의 최대값을 나타낸다. 식 (2)를 통해 알 수 있듯 n 차 고조파 성분의 크기는 주입하는 고조파 전류의 크기에 대한 선형결합으로 나타나게 되며 b_m 을 계수로 갖는다. 주입하는 고조파 전류의 크기와 n 차 고조파 성분의 크기 사이의 관계를 고조파 크기 함수라고 정의한다.

2.2.1 최소전류 고조파 주입

계통 전류에 고조파 전류를 주입하게 되면 고조파 성분으로 인해 계통단의 역률이 낮아지게 된다. 따라서 본 논문에서는 최적화 문제를 통해 최소한의 고조파 전류 주입량을 계산한다. 주입되는 고조파 전류의 제곱 합이 최소가 되는 고조파 전류의 해를 찾기 위해 2차 계획법(Quadratic programming)을 사용하였다. 최적화 문제의 목표와 제한조건은 다음과 같다.

$$\text{Goal: minimize } \sum_m I_m^2 \quad (3)$$

$$\text{Constraints: } b_n \leq R_n \cdot M \quad (n=1,2,3,4,\dots)$$

식 (3)에서 R_n 은 계통 전류의 n 차 고조파에 대한 규정치를 나타낸 것이며 M 은 마진을 나타낸다.

3. 시뮬레이션 결과

그림 3의 (a)는 실제 제어 성능의 한계를 고려하여 3차 고조파만을 주입하였을 때 계통 전류의 고조파 성분을 분석한 그래프이며 (b)는 고조파가 주입된 계통 전류의 파형을 나타낸다. 그림 4의 (a)는 3, 5, 7, 9차 4개의 고조파 성분을 주입하였을 때 계통 전류의 고조파 성분을 분석한 그래프이며 (b)는 고조파가 주입된 계통 전류의 파형을 나타낸다. 시뮬레이션 조건은 계통 전류가 16Arms인 시스템에 대해 고조파 주입을 수행하였다. 계통 전류의 고조파 규정은 IEC61000-3-12를 기준으로 하였으며 마진은 규정치의 5%로 설정하였다. 3고조파만을 주입하였을 때 임계 직류단 최소 전압은 188V이며 주입한 고조파 전류의 크기는 3A(I_1 의 13%)이다. 3, 5, 7, 9차 4개의 고조파 성분을 주입하였을 때 임계 직류단 최소 전압은 220V이며 주입한 고조파 전류의 크기는 각각 5.6A(I_1 의 25%), 1.8A(I_1 의 8%), 0.47A(I_1 의 2%), 0.067A(I_1 의 0.2%)이다.

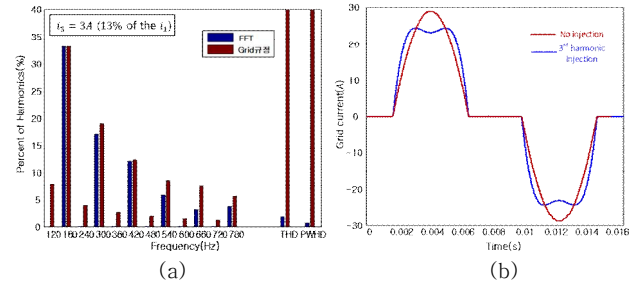


그림 3 3고조파 전류 주입 $V_{dc.min}=188V$ (a) 계통 전류 고조파 성분 분석 (b) 계통 전류 파형

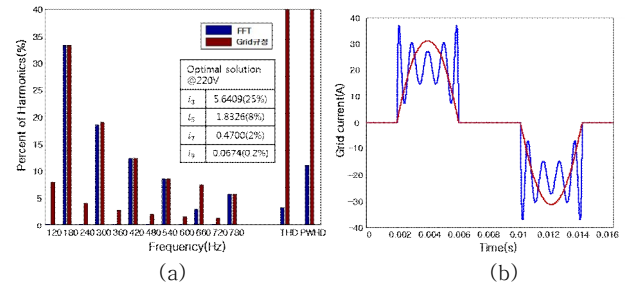


그림 4 3, 5, 7, 9고조파 전류 주입 $V_{dc.min}=220V$ (a) 계통 전류 고조파 성분 분석 (b) 계통 전류 파형

4. 결론

본 논문에서는 단상 소용량 직류단 캐패시터를 가지는 시스템에서 계통 전류에 고조파 전류주입을 통하여 기존의 연구에서 제안한 직류단 최소 전압의 임계점을 높였다. 주입하는 고조파 전류의 크기와 계통 전류의 고조파 성분 사이의 고조파 크기 함수를 구해 계통 전류의 고조파 성분을 조정할 수 있도록 하였으며 계통의 역률을 고려해 최적화 문제를 풀이함으로써 최소한의 고조파 전류 주입량을 계산하였다. 제안된 방법의 타당성은 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

참고 문헌

- [1] 신호준, "소용량 수동 소자와 직류단 보조 에너지 저장 회로를 가지는 교류전동기 구동 시스템에 관한 연구," 서울대학교, 공학 박사 학위 논문, 2015.