

a-b-c 프레임에 근거한 AC-DC 변환기용 세가지 제어전략

이동수, 김지웅, 전성준, 허만탁
부경대학교

Three control strategies based on a-b-c frame for AC-DC converter

Dong-Su Lee, J-Woong Kim, Seong-Jeub Jeon, Man-Tak Huh
Pukyong National University

ABSTRACT

Three control strategies that can be applied to a three-phase AC-DC converter under unbalanced input voltage condition are discussed. Analytic solutions are given on the a-b-c frame, and are very simple, direct and intuitive. All of the strategies guarantee sinusoidal input currents. All the control functions, including decoupled current control and PWM, are implemented on the a-b-c frame. Accordingly, the controller is very simple and robust. The proposal is verified by simulation and experiments on a prototype operating at 15 kHz

1. 서론

그림 1과 같은 PWM AC-DC 변환기는 중대형 응용 분야에 널리 쓰이고 있다. 대칭 3상은 단상에 비하여 많은 이점이 있는데 그 중에서도 순시 전력이 일정할 수 있다는 것은 직류 측 캐패시터의 크기를 줄일 수 있어 경제적으로 아주 큰 이점이다. 그러나 비대칭 전원에서는 일정 전력과 정현파 전류를 얻는 것은 쉬운 일이 아니다.^[1,2] 비대칭 전원하의 변환기를 제어하기 위하여 d-q 변환에 근거한 p-q 이론이나 대칭좌표이론이 쓰이고 있으나 이것들이 효과적인 방법이라고 볼 수 없다.^[3-6]

본 논문에서는 비대칭 전원 하에서 일정 전력을 가져다주는 해를 제시하고 전류제어기가 이를 추적해 가도록 하였다.^[7,8] 나아가 일정 전력을 제공하는 해뿐만 아니라 IEEE std. 1459-2000의 기초가 되는 Buchholz의 이론에 따른 단위 역률을 제공하는 해와 최소의 대칭 전류를 제공하는 해를 a-b-c 프레임에서 구하였고 전류제어기를 a-b-c 프레임에서 구현하였다.^[7,9] PWM(Pulse Width Modulation)을 포함한 세가지 전략 모두가 a-b-c 프레임에서 구현하는 것이 d-q 프레임에서 구현하는 것보다 훨씬 유리함을 알 수 있다.^[7,11]

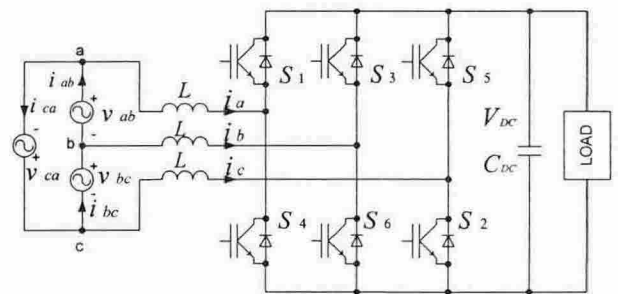


그림 1. 3상 AC-DC 변환기

2. 제안된 시스템

대부분의 AC-DC 변환기는 그림2와 같은 구조로 구현될 수 있다. 직류링크 제어기는 직류 측 전압을 제어하면서 기준 전류 신호를 생성한다. 전류 제어기는 선 전류가 기준 전류신호를 추종하도록 제어한다. 본 논문에서 다룰 세 가지 전략은 동일한 구조의 제어기를 사용하는데 직류 링크 제어기가 제공하는 기준 전류신호가 달라진다.

2.1 전류 제어

그림 3은 그림 2의 내부 루프를 보다 자세하게 그린 것이다. 기준 전류 신호(i_a^* , i_b^* , i_c^*)가 가져야 하는 중요한 성질 중의 하나는 세 신호의 합이 항상 영이어야 한다. 그것은 실제 전류(i_a , i_b , i_c)의 합이 항상 영이기 때문이다. 만일 그 합이 영이 아닌 기준제어신호가 제공된다면 제어기는 달성할 수 없는 목표가 제공된 것이므로 정상적인 동작을 기대할 수 없다. 만일 전류 제어기가 선형제어기라면 전류제어기의 출력신호는 그 합이 영이 될 것이다. 이 출력신호는PWM 변환기의 변조신호가 된다. 이 신호에 따라 PWM 변환기는 그 출력을 생성한다. 인덕터에는 PWM 변환기 출력과 가상 중선점에 대한 전압의 차가 인가되어 실 전류가 형성된다.

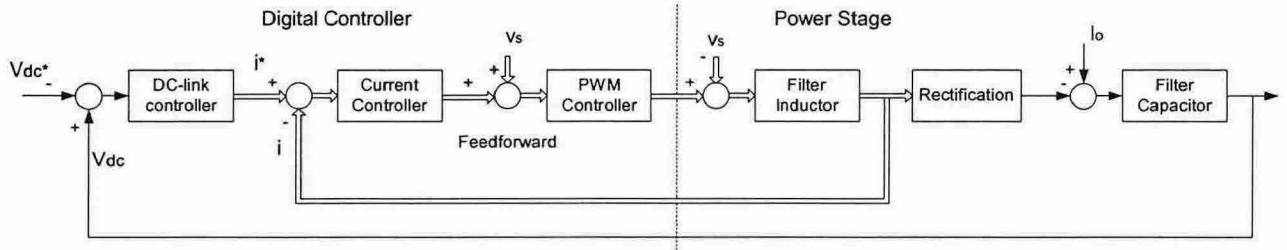


그림 2. 제어 루프의 구성

세 AC 인덕터의 값이 동일하다면 전류의 합이 영이 되고 PWM 변환기 입력 즉 변조 신호를 전류 제어기 출력에서 가상 중선점에 대한 전압을 뺀 신호를 가하면 그림 4와 같이 전원의 가상 중선점과 부하의 가상 중선점을 연결할 수 있어 전력부는 단순화 되고 각 선의 전류는 독립적으로 제어된다. 실제시스템에서는 측정 등의 오차로 실전류의 합이 영이 아닌 것처럼 주어질 수 있다. 이런 경우 제어는 정상적으로 이루어지지 않는다. 그래서 전류 제어기는 두 개만을 구성하고 나머지 하나의 제어기 출력은 다른 두 제어기 출력으로부터 구하는 것이 좋다. 가상 중선점에 대한 선전압은 선간 전압으로부터 다음과 같이 주어진다.

$$v_{sa} = \frac{1}{3}(v_{ab} - v_{ca}), v_{sb} = \frac{1}{3}(v_{bc} - v_{ab}), v_{sc} = \frac{1}{3}(v_{ca} - v_{bc}) \quad (1)$$

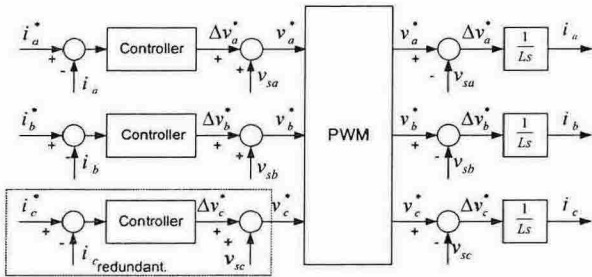


그림 3. 내부 루프의 구성

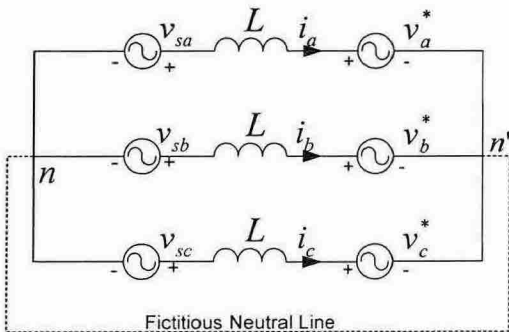


그림 4. 단순화한 전력부

1.2 단위 역률 전략

Buchholz 이론에 따른 단위 역률은 전류를 다음과 같이 제어하여 얻을 수 있다.

$$i_a = \frac{P}{V_{sa}^2 + V_{sb}^2 + V_{sc}^2} v_{sa}, i_b = \frac{P}{V_{sa}^2 + V_{sb}^2 + V_{sc}^2} v_{sb} \quad (2)$$

v_{sa}, v_{sb} 는 (1) 식으로 주어진 가상 중선점에 대한 선 전압이다.

1.3 일정 전력 전략

많은 연구자들이 비대칭 전원하에서 직류 링크에서의 캐패시터 크기를 줄이기 위하여 매우 복잡한 방법으로 일정 전력을 실현하였다. 그러나 입력 전류가 정현파라고 가정하면 다음과 같은 전류는 일정 전력을 제공한다.^[7-8]

$$i_1 = \frac{P}{V_{1m} \sin \theta} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2} - \theta), \quad (3a)$$

$$i_2 = \frac{P}{V_{2m} \sin \theta} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}). \quad (3b)$$

V_{1m}, V_{2m} 은 임의의 선에 대하여 측정된 선간전압 (v_{1m}, v_{2m})의 실효치이고 θ 는 위상차이다.

1.4 대칭 전류 전략

변환기의 전력 소자의 입장에서 본다면 각 선의 전류의 최대치가 작은 것이 유리하다. 이는 대칭 전류를 흘려서 얻을 수 있다. 동일한 대칭 전류로 최대의 전력을 전달하는 것이 바람직 한데 a-b-c 프레임에서는 다음과 같은 크기를 갖는 전류를 대칭으로 흘리면 가장 적은 최대전류(전류 스트레스)가 얻어진다.

$$I_m = \frac{2P}{\sqrt{V_{1m}^2 + V_{2m}^2 + 2V_{1m}V_{2m} \cos\left(\frac{2\pi}{3} - \theta\right)}} \quad (4)$$

v_{1m} 과 그 선 전류는 다음과 같은 위상차 ϕ_l 을 갖는다.

$$\phi_l = \arctan \left(\frac{V_{2m} \sin\left(\frac{2\pi}{3} - \theta\right)}{V_{1m} + V_{2m} \cos\left(\frac{2\pi}{3} - \theta\right)} \right) \quad (5)$$

3. 실험 및 고찰

불평형 전압을 얻기 위하여 전원측 a 선을 실제 중성점에 단락시켜 V_{ab} , V_{ca} 는 139[V], V_{bc} 는 240[V]로 만들어 불평형률이 39.5 [%]가 되었다. 그림 4, 5, 6은 각기 단위역률 전략, 일정 전력전략과 대칭전류 전략에 따른 실험 결과이다. 단위 역률 전략은 가장 작은 실효전류를 만들고, 대칭전류 전략은 가장 작은 최대전류를 만들어준다. 일정 전력전략은 가장 큰 전류를 흘리게 한다. 세 전략이 모두 a-b-c 프레임에서 구현될 수 있음을 알 수 있다. a-b-c 프레임에서의 제어는 d-q 프레임에서의 제어 보다 손쉽고 유연성이 있다고 하겠다.

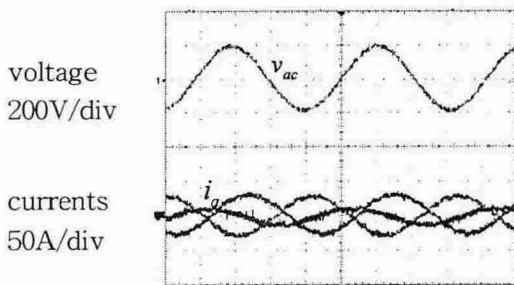


그림 5. 단위 역률 전략

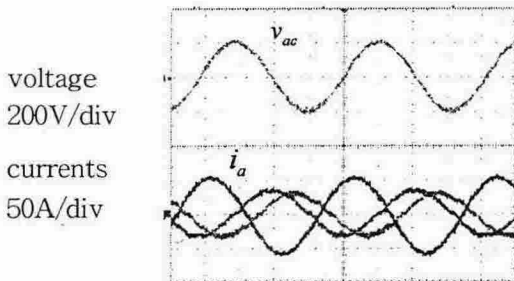


그림 6. 일정 전력 전략

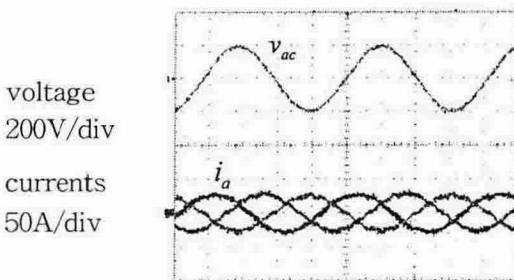


그림 7. 대칭전류 전략

3. 결론

불평형 입력전압하에 동작하는 세가지 전략에 대하여 연구하였다. 사용되는 환경에 따라 선택될 수 있다. PWM 등 모든 기능이 a-b-c 프레임에서 구

현되었다. 제안한 것은 15 kHz로 동작하는 프로토타입으로 입증하였다. 이 제안이 AC-DC 변환기의 성능을 향상시킬 것으로 기대된다.

참고 문헌

- [1] P.N. Enjeti, P.D. Ziogas and M. Ehsani, "Unbalanced PWM Converter Analysis and Corrective Measures," in *Proc. IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 1989, pp.861-870.
- [2] M.H. Rashid and A.I. Maswood, "Analysis of Three-Phase AC-DC Converters under Unbalanced Supply Conditions," *IEEE Trans. Industry Applications*, Vol. 24, No. 3, pp.449-455, 1988.
- [3] H.S. Song and K.H. Nam, "Dual Current Control Scheme for PWM Converter Under Unbalanced Input Voltage Conditions," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, Vol. 46, No. 5, pp.953-959, 1999.
- [4] J.K. Kang and S.K. Sul, "Control of Unbalanced Voltage PWM Converter Using Instantaneous Ripple Power Feedback," in *Proc. IEEE Power Electronics Specialist Conference*, 1997, pp.503-508.
- [5] H. Akagi, Y. Kanazawa and A. Nabae, "Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices without Energy Storage Components," *IEEE Trans. Industry Applications*, Vol. 20, No. 3, pp.625-630, 1984.
- [6] P.N. Enjeti and S.A. Choudhury, "A New Control Strategy to Improve the performance of a PWM AC to DC Converter Under Unbalanced Operating Conditions," *IEEE Trans. Power Electronics*, Vol. 8, No. 4, pp.493-500, 1993.
- [7] A.V. Stankovic and T.A. Lipo, "A Novel Control Method for Input Output Harmonic Elimination of the PWM Boost Type Rectifier Under Unbalanced Operating Conditions," *IEEE Trans. Power Electronics*, Vol. 16, No. 5, pp.603-611, 2001.
- [8] S.J. Jeon and F.C. Lee, "Three Control Strategies for a Three-Leg AC-DC Converter Under Unbalanced AC Voltage Condition," in *proc. IEEE Industrial Electronics Annual Conference*, 2003, pp. 186-191.
- [9] G.W. Chang and S.K. Chen, "An a-b-c Reference Frame-Based Control Strategy for the Three-Phase Four-Wire Shunt Active Power Filter," in *Proc. IEEE Harmonics and Quality of Power*, 2000, pp. 26-29.
- [10] D.W. Chung, J.S. Kim and S.K. Sul, "Unified Voltage Modulation Technique for Real-Time Three-Phase Power Conversion," *IEEE Tran. Industry Applications*, Vol. 34, No. 2, pp.374-380, 1998.
- [11] R.C. Panaitescu and N. Mohan, "A simple Space-Vector PWM Algorithm for VSI-fed AC Motor Drives," in *Proc. IEEE Applied Power Electronics Conference*, 2002, pp.72-75.