

고조파 혼합 지령 기반 3상 PCS 단독 운전 환경에서의 전력 최적화 기법

김동연, 하정익
서울대학교 전기정보공학부

Power Optimization Strategy in 3-Phase PCS Standalone System Based on Harmonic-mixed Command

Dong Eon Kim, Jung Ik Ha

Dept. of Electrical and Computer Engineering, Seoul National University

ABSTRACT

태양광, 풍력 등 신재생 에너지 비중이 확대되면서 마이크로 그리드 기술의 중요성이 대두되고 있다. 마이크로그리드는 임의의 전력망을 계통과 분리된 자립 운전의 형태로 운영하는 것을 목적으로 하며, 이에 따라 그리드 내의 실시간 부하 감지 및 제어 기술이 필요하다. 본 논문에서는 기본파 전류만을 제어하여 전력을 공급하던 기존 방법과 달리 고조파 전류를 함께 제어하여 여러 주파수에서 전력을 공급함으로써, 부하의 특성을 감지함과 동시에 부하 특성에 따라 최적의 전력 공급 지령을 제어하는 방법을 제시한다.

1. 서론

한전 계통과 같은 단일 계통에 의해 전력을 공급하는 기존의 전력시스템에서는 배전단(버스) 전압을 순수 기본파로 제어하며, 기본파 전압 및 전류에 의해서만 전력을 공급하도록 규정하고 있다. 이 방식은 능동 소자를 포함하며 비선형성을 갖는 부하가 계통에 연결될 경우 전류 왜곡으로 인해 역률 및 효율 측면의 품질 저하가 불가피하다는 한계가 있다.

마이크로그리드는 태양광, 풍력 등 재생에너지 비중 확대를 배경으로 효율적인 전력망 운영을 위해 제안되었으며, 하나의 마이크로그리드 셀(Cell, 소 전력망) ESS(Energy Storage System) 및 분산 전원에 연계된 다중 PCS(Power Conversion System)로 구성되어 있다. 평상시에는 계통과 연계되어 버스 전압을 공유한 채로 운영되나, 계통 및 수송부 점검과 같은 상황으로 인한 계통단 차단 시 셀 내의 분산 전원에 의한 독립 운전 모드로 운영된다. 이 때 마이크로그리드 내의 버스 전압을 독립적으로 제어할 수 있다.^[1]

본 논문에서는 고조파를 혼합한 버스 전압 제어를 이용하여 마이크로그리드의 단독 운전 상황에 한하여 적용할 수 있는 전력 공급 방식을 제시한다. 배전단 전압 또는 PCS 전류의 왜곡을 감지하고, 수식적 계산을 통해 각 주파수 성분의 최적 전력 공급 조건(배전단 전압, PCS 입력 전류) 지령을 생성한다. 시뮬레이션에서는 단일 PCS와 3상 정류기를 연결하고, PCS의 지령 전압의 고조파 성분비를 조정하면서 각 경우의 출력 전력을 측정하여 기존 계통 방식과 제안하는 방식을 비교하였다.

2. 본론

2.1 최적화 조건의 수식적 계산

셀의 버스 전압과 부하에 공급되는 전류의 $k(k \geq 1)$ 차 고조파 성분을 다음과 같이 각 상에 대해 정의한다. 이 때 3상 전압 및 전류의 균형을 가정한다.

$$V_{ka} = V_k \sin(k\omega t) \quad I_{ka} = I_k \sin(k\omega t + \phi_k) \quad (1)$$

$$V_{kb} = V_k \sin(k(\omega t - \frac{2}{3}\pi)) \quad I_{kb} = I_k \sin(k(\omega t - \frac{2}{3}\pi) + \phi_k)$$

$$V_{kc} = V_k \sin(k(\omega t + \frac{2}{3}\pi)) \quad I_{kc} = I_k \sin(k(\omega t + \frac{2}{3}\pi) + \phi_k)$$

이 때 부하에 공급하는 피상 전력 및 유효, 무효 전력은 다음과 같이 나타낸다.

$$S = \frac{3}{2} \sum_{k=1}^{\infty} V_k I_k \quad (2)$$

$$P = \frac{3}{2} \sum_{k=1}^{\infty} V_k I_k \cos \phi_k$$

$$Q = \frac{3}{2} \sum_{k=1}^{\infty} V_k I_k \sin \phi_k$$

2.1.1 역률 최적화

선형 부하의 경우 부하 제정수와 주파수가 고정될 시 임피던스 위상에 의해 부하 자체 역률이 고정된다. 반면 비선형 부하의 경우 이러한 임피던스의 정의가 불가능하고, 주파수 성분 간의 응답 형태가 상호 의존적이므로, 입력 전압의 고조파 성분비 또는 각 성분의 위상에 따라 주파수 성분 별 전압 대비 전류 위상이 가변적이다. 이에 따라 제한 조건 내에서 각 성분의 위상차를 최소화하는 방향으로 지령을 설정하여야 한다.

2.1.2 효율 최적화

전력 효율은 부하 특성뿐만 아니라, 라인 임피던스(Line impedance)와 같은 손실 성분에 의해 제한된다. 라인 임피던스를 다음과 같이 저항과 인덕턴스 성분의 합성으로 가정하여 정의한다.

$$Z_{kl} = R_l + jX_{kl} = R_l + jk\omega L_l \quad (3)$$

위에서 정의한 버스 전압 및 부하 전류를 다음과 같이 위상차의 형태로 재정의한다.

$$V_{kabc} = V_k e^{j\omega t} \quad (4)$$

$$I_{kabc} = I_k e^{j(\omega t + \phi_k)}$$

이 때 PCS의 입력 전압 지령은 다음과 같이 나타난다.

$$V_{P,kabc} = V_{kabc} + Z_{kt}I_{kabc} = V_k e^{j\omega t} + Z_{kt}I_k e^{j(\omega t + \phi_k)} \quad (5)$$

전력 효율은 다음과 같이 계산된다.

$$P_{out} = \frac{3}{2} \sum_{k=1}^{\infty} V_{kabc} I_{kabc}^* = \frac{3}{2} \sum_{k=1}^{\infty} V_k I_k \cos \phi_k \quad (6)$$

$$P_{in} = P_{out} + \frac{3}{2} \sum_{k=1}^{\infty} I_k^2 R_l$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{\sum_{k=1}^{\infty} V_k I_k \cos \phi_k}{\sum_{k=1}^{\infty} (V_k I_k \cos \phi_k + I_k^2 R_l)}$$

수식 (6)을 통해 주파수 성분에 대해 역률에 해당하는 $\cos(\phi_k)$ 값이 커질수록 효율이 증가함을 알 수 있다. 이에 따라 각 주파수에 대해 역률을 최적화할 경우 효율도 함께 증가함을 알 수 있다. 그러나 비선형 부하 특성의 직접 대입은 어려우므로, 부하 감지를 통해 단계적 최적화 과정이 필요하다.

2.2 시뮬레이션

그림 1과 같이 PLECS Simulink 연계 시뮬레이션을 통해 3상 PCS 단독 운전 상황에서의 계통 방식과 고조파 혼합 방식의 출력을 비교하였다. PCS는 3상 인버터에 LCL 필터를 연결한 형태이며, 라인 임피던스를 직렬로 연결하였다. 계통 방식의 경우 고조파 혼합 방식과 같은 rms(root mean square)의 3상 계통 전원을 라인 임피던스 및 부하에 연결하여 확인하였다.

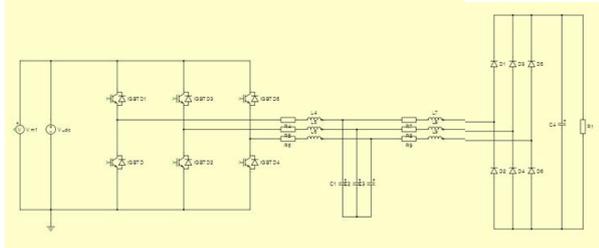


그림 1 단일 PCS, 3상 정류기 연계 회로도

Fig. 1 Schematic of single PCS and 3-phase rectifier connection

표 1 PCS 및 3상 정류기 제정수
Table 1 Parameters of PCS and 3-phase rectifier

		f_c (Hz)	60
V_1 (V)	179.63	R_l (Ω)	0.1
R_l (Ω)	0.1	L_l (mH)	1
L_l (mH)	1	C_{load} (μ F)	100
C_l (μ F)	10	R_{load} (Ω)	10

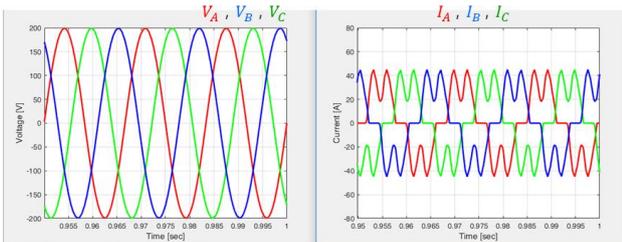


그림 2 계통 방식의 버스 전압 및 부하 전류 파형

Fig. 2 Waveform of bus voltage and load current of grid operation method

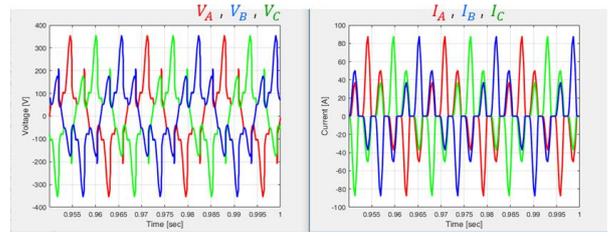


그림 3 고조파 혼합 방식의 버스 전압 및 부하 전류 파형

Fig. 3 Waveform of bus voltage and load current of harmonic-mixed operation method

표 2 고조파 혼합 방식의 PCS 전압 구성

Table 2 Composition of PCS voltage on harmonic-mixed operation method

차수	기본과 대비 비율(%)	크기(V)	위상(deg)
1	100	220	0
5	43	94.6	15
7	21	46.2	135

표 3 계통 방식과 고조파 혼합 방식의 결과 비교

Table 3 Result comparison between grid operation method and harmonic-mixed operation method

	계통 방식	고조파 혼합 방식
P(kW)	10.31	12.42
Efficiency(%)	98.3	98.9
Power factor	89.4	89.5

반복적인 대입을 통해 혼합 고조파 성분비를 위의 표 2와 같이 구하였고, 이에 따른 결과는 표 3에 나타나 있다. 같은 rms의 전압 조건에서 고조파 혼합 방식을 적용할 시 계통 방식에 비해 출력 전력은 14% 증가하였으며, 효율과 역률은 근소하게 증가함을 확인할 수 있다.

3. 결론

수식을 통해 같은 크기의 전압 조건에서 고조파 혼합 방식이 계통 방식에 비해 더 큰 전력 공급 능력이 있음을 예측하였고, 시뮬레이션을 통해 실제 14%의 공급 능력 차이가 있음을 확인하였다. 또한 역률 및 효율 측면에서도 근소하게 이득이 있음을 확인하였다.

이 논문은 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술연구원(KETEP)의 연구비 지원에 의하여 연구되었음
(No.20151210200080)

참고 문헌

- [1] Kyung Hwan Lee, Yongjae Lee, and Jung Ik Ha, "New Current control Strategy for Local Converter Under Distorted Grid Conditions", Proceedings of the IEEE, Vol. 75, No. 4, pp. 978-982, 2014, April.
- [2] Wenbo SU, Zhaoxiang LI, and Zhenguo SHAO, "The Harmonic Calculation Model of Non linear Load", 2014 China International Conference on Electricity Distribution (CICED 2014) Shenzhen, 23-26, 2014, September