

수전해 시스템 전력 공급을 위한 능동형 필터 제어

우덕용*, 김동욱**, 심재용**, 김성민*
 한양대학교*, 한국전력 전력연구원**

Active Power Filter Control for Power Supply of Water Electrolysis System

Deokyong Woo*, Dong-Wook Kim**, Jaeyong Sim**, Sungmin Kim*
 Hanyang University*, Korea Electric Power Research Institute**

ABSTRACT

수소 생산을 위해 교류 계통으로부터 수전해 시스템에 직류 전원을 공급하기 위해서는 AC/DC 전력 변환 과정이 필요하다. 단방향 전력 전달을 요구하는 수전해 시스템의 경우 다이오드 정류기의 사용은 비용 및 신뢰성 측면에서 상당히 효과적이지만, 고조파 전류 방출로 인한 전력 품질 저하가 발생한다는 치명적인 단점을 갖는다. 능동형 필터 (Active Power Filter: APF)를 다이오드 정류기에 병렬로 연결하면, 다이오드 정류기의 이점을 확보함과 동시에 비선형 부하로부터 발생하는 고조파 전류 왜곡을 효과적으로 보상하여 전력 품질 문제를 해결할 수 있다. 뿐만 아니라 APF는 고조파 전류 성분만을 공급하기 때문에 컨버터의 사양을 대폭 줄일 수 있어 비용 측면에서 유리하다. 그러나, 대용량 수전해 시스템의 경우 APF의 스위칭 주파수 제약으로 인해 고차 고조파 전류 제어에 대한 한계가 존재한다. 본 논문에서는 낮은 스위칭 주파수를 갖는 APF의 한계를 해결하고 높은 차수의 고조파 전류를 정밀하게 제어하여 전력 품질을 효과적으로 보상한다.

Key words: Water electrolysis, active power filter, power quality compensation

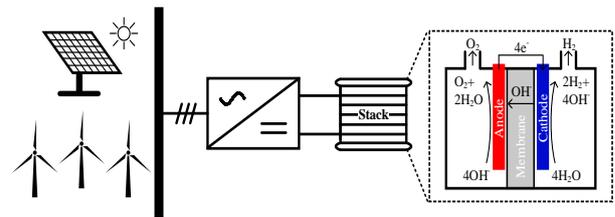


그림 1 재생 에너지 기반 그린 수소 생산 시스템 구성도
 Fig. 1. Scheme of green hydrogen production system based on renewable energy

2) 전력 품질 보상: 수전해 시스템은 DC 부하이기 때문에, 전력공급 과정에서 계통 고조파 왜곡을 발생시키므로 이를 보상해야 한다.

3) 신뢰성 확보: 전원 공급의 중단은 전해조의 수명 감소로 이어지기 때문에 컨버터의 이상 동작 시에도 가능한 전원 공급을 유지하도록 해야 한다^[2].

본 논문에서는 이러한 사항들에 초점을 맞춰 대용량 수전해 시스템 전력공급을 위한 다이오드 정류기와 APF의 병렬 구조에 대해 다루고, 낮은 스위칭 주파수로 동작하는 대용량 APF의 제어에 대해 논의한다.

I. 서 론

전 세계적으로 기후 변화에 대비하여 탄소 중립 목표를 달성하기 위해 친환경적인 기능에 관한 관심이 높아지고 있다. 수소는 수송, 에너지 저장, 전력 계통 연계, 수소 산업 등 다양한 방향으로 활용될 수 있어서 탄소 중립 목표 달성을 위해 주목받았으며, 수소 생산에 관한 많은 연구가 진행되었다. 특히, 그림 1과 같이 재생 에너지만을 사용하여 탄소 배출 없이 생산된 수소를 그린 수소라 하는데, 오늘날 그린 수소의 생산은 탄소 중립 목표 달성을 위한 한 축으로 자리잡고 있다.

전자의 공급을 통해 물의 화학적 반반응 작용을 일으켜 부산물인 수소를 추출하는 과정을 수전해라고 하며, 수전해 동작을 위해서는 반드시 전해조에 직류 전원을 공급해야 한다. 따라서, 교류 계통으로부터 전해조에 직류 전원을 공급하기 위해서는 AC/DC 컨버터가 필요하며, 컨버터 구성 시에는 다음의 사항을 고려해야 한다.

1) 직류단 맥동 최소화: 직류단 맥동은 전해조의 수소 생산 효율 저하의 원인이므로, 효율을 증가시키기 위해 직류단 맥동을 가능한 최소화해야 한다^[1].

II. 수전해 시스템 전력 공급 장치의 구분

수전해 시스템 전력 공급 장치는 크게 단일 AC/DC 전력 변환 구조와 2단계 AC/DC/DC 전력 변환 구조로 구분되며, 본 절에서는 두 구조에 대한 장단점을 비교한다^[3].

A. 단일 AC/DC 전력 변환 구조

그림 2(a)와 같이 단일 AC/DC 전력 변환 구조는 하나의 AC/DC 컨버터를 통해 전해조에 직류 전원을 공급하는 구조이며, 구조가 간단하고 가격이 저렴하다는 장점이 있다. 그러나, AC/DC 컨버터의 직류단 전압을 계통 선간전압 아래로 낮출 수 없으므로 전해조 입력 전압을 유연하게 가변시킬 수 없다는 단점을 갖는다. 전해조 입력 전압 범위를 넓히기 위해서 교류단 전압을 과도하게 낮추면 동일 전력 대비 전류의 크기가 상당히 증가하기 때문에 이러한 구조는 대용량 수전해 시스템에는 적합하지 않다. 이 구조는 직류단 맥동을 최소화하기 위해 일반적으로 Active Front End (AFE) 컨버터가 주로 채택되며, 다이오드 정류기의 사용은 직류단 맥동 저감을 위해 커패시터의 크기가 상당히 커질 수 있으므로 선호되지 않는다.

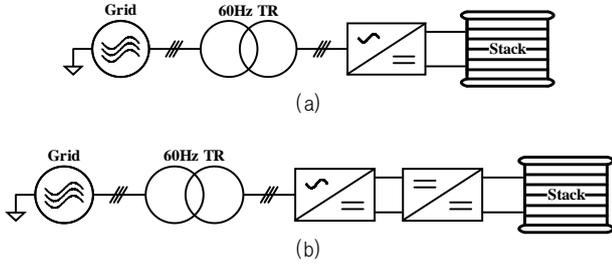


그림 2 수전해 시스템 전력 공급 장치의 구분. (a) 단일 AC/DC 전력 변환 구조. (b) 2단계 AC/DC/DC 전력 변환 구조.
Category of water electrolyzer power supply. (a) Single-stage AC/DC power supply. (b) Two-stage AC/DC/DC Power supply.

B. 2단계 AC/DC/DC 전력 변환 구조

그림 2(b)와 같이 2단계 AC/DC/DC 전력 변환 구조는 하나 이상의 AC/DC 및 DC/DC 컨버터를 통해 전해조에 직류 전원을 공급하는 구조이며, 단일 AC/DC 전력 변환 구조에 비해 구조가 복잡하고 가격이 고가라는 단점이 있다. 그러나, 전해조 입력 전압을 DC/DC 컨버터를 통해 유연하게 가변할 수 있어서 교류 전압을 과도하게 낮출 필요가 없으며, 계통단과 전해조가 전기적으로 절연될 수 있다는 장점이 있다. 게다가, 이 구조는 DC/DC 컨버터의 직류단이 전해조로 연결되기 때문에 AC/DC 컨버터의 직류단 맥동에 대한 제약이 비교적 자유로워서, AFE 컨버터가 아닌 다이오드 정류기나 싸이리스터 정류기를 채택하여 시스템의 신뢰성을 확보할 수 있다. 이러한 장점들로 인해 대용량 수전해 시스템의 전원 공급 장치는 주로 이중 AC/DC/DC 전력 변환 구조가 선호된다.

따라서, 본 논문에서는 대용량 수전해 시스템에 초점을 맞춰 이중 AC/DC/DC 전력 변환 구조를 바탕으로 수전해 시스템의 전원 공급 장치 구성에 대한 설명을 진행한다.

III. 다이오드 정류기와 APF의 병렬 구조

다이오드 정류기는 저렴한 비용, 구조의 단순함, 높은 신뢰성으로 인해 오랫동안 AC/DC 전력 변환을 위해 산업계에서 선호되었다. 직류단 맥동이 수소 생산 효율과 직결되는 수전해 시스템에서 다이오드 정류기의 사용은 비효율적일 수 있지만, AC/DC/DC 전력 변환 구조는 전해조로 연결되는 직류단을 DC/DC 컨버터가 조절하기 때문에 다이오드 정류기가 여전히 효과적으로 사용될 수 있다. 그러나, 정류 과정에서 교류 계통으로 방출되는 고조파 전류로 인한 전력 품질 저하는 다이오드 정류기 사용 시 반드시 고려해야 한다.

전력 품질 저하는 그림 3과 같이 APF가 Point Common Coupling (PCC)에 병렬로 연결되어 고조파 전류원으로 작동함으로써 해결할 수 있다. 대용량 수전해 시스템 가동을 위한 전력을 AFE 컨버터와 같이 스위칭 소자로 구성된 PWM 컨버터를 통해 전달하면 스위칭 소자의 사양 한계로 인해 멀티 레벨 컨버터나 컨버터의 병렬 연결이 필요하게 되어 시스템 구성이 복잡해질 수 있다. 그러나, APF는 고조파 성분만을 공급하기 때문에 스위칭 소자의 사양을 대폭 줄일 수 있어 시스템이 복잡해지는 문제를 효과적으로 해결할 수 있으며, APF를 통해 고조파 전류를 유연하게 보상함으로써 다이오드로 인한 전력 품질 저하 문제를 해결할 수 있다. 뿐만 아니라, 신뢰성이 우수한 다이오드 정류기가 부하 전력 전달을 담당하기 때문에 신뢰성이 비교적 낮은 PWM 컨버터인 APF에 고장이

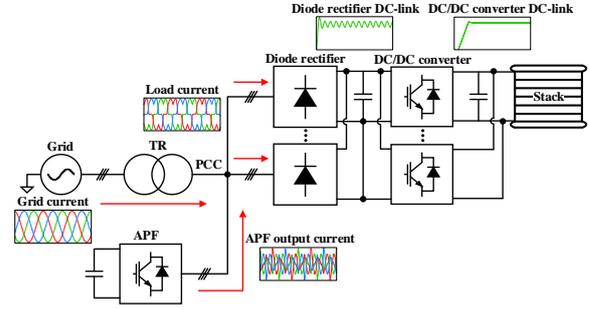


그림 3 다이오드 정류기와 APF의 조합을 통한 이중 AC/DC/DC 전력 변환 구성도
Fig. 3. Two-stage AC/DC/DC converter scheme through a combination of a diode rectifier and an APF

발생하여 기동이 중단되더라도 전해조에 전력 공급을 유지할 수 있다는 장점이 있다.

대용량 시스템의 경우 스위칭 주파수의 제약이 존재하여, APF를 통한 고조파 전류 제어가 어려울 수 있다. 또한, APF 출력 필터가 LCL 필터일 경우 고조파 전류 제어가 더욱더 어려워질 수 있다. APF가 가능한 높은 주파수의 고조파 전류를 제어할수록 부하단에 연결되는 수동 필터의 크기를 줄일 수 있어 비용 측면에서 유리하기 때문에 여러 요인들로 의한 고조파 전류 제어의 어려움을 해결하고 가능한 높은 주파수의 고조파 전류를 안정적으로 제어하는 것이 중요하다.

IV. 능동형 필터 제어

A. 고조파 전류 제어기

Proportional Integral (PI) 제어기의 적분기는 직류 입력 신호에 대하여 개루프 전달 함수의 무한 이득을 제공하여 정상상태 오차 없이 직류 입력 신호를 추적할 수 있다. 그러나, 적분기는 정현파 신호에 대한 무한 이득을 제공하지 못하기 때문에 정현파 입력 신호를 정상상태오차 없이 추적할 수 없다. 따라서, PI 제어기를 통해 정현파 신호를 제어하려면 좌표 변환을 통해 정현파 신호를 직류 신호로 변환해야 한다. 그러나, APF와 같이 많은 수의 고조파 전류를 제어해야 하는 경우 좌표 변환의 수가 많아져 연산량의 부담이 커지기 때문에 PI 제어기의 사용은 적절하지 않다. 공진형 제어기는 특정 주파수에 대해 무한 이득을 제공하기 때문에 정현파 입력 신호를 정상상태 오차 없이 추적할 수 있어 좌표 변환이 필요하지 않고 구현이 간단하여, 여러 고조파 전류를 제어해야 하는 APF에 적합하게 적용될 수 있다.

공진형 제어기는 대표적으로 Proportional Resonant (PR) 제어기와 Vector Proportional Integral (VPI) 제어기로 구분된다. VPI 제어기는 PR 제어기에 비해 고차 고조파 전류 제어에 강인한 특성을 가진다. VPI 제어기의 전달 함수는 다음과 같다^[4].

$$H_{VPI}^h(s) = \frac{K_{ph}s^2 + K_{ih}s}{s^2 + (h\omega_e)^2} \quad (1)$$

여기서 h 는 고조파 차수이고, K_{ph} 와 K_{ih} 는 각각 비례 이득과 적분 이득, ω_e 는 Phase Locked Loop (PLL)을 통해 추정된 계통 각 주파수이다. 시스템 지연 요소로 인한 제어기의 불안정성을 보상하기 위해 (1)의 제어기는 다음과 같이 위상 보상을 포함한 형태로 나타낼 수 있다.

$$H_{VPI}^h(s) = \frac{(K_{ph}s + K_{ih})[s \cos(\phi_h) - h\omega_e \sin(\phi_h)]}{s^2 + (h\omega_e)^2} \quad (2)$$

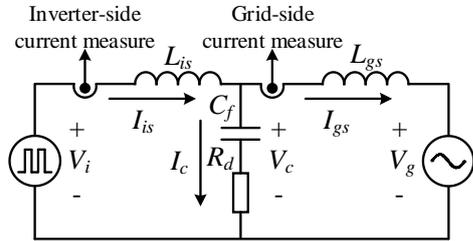


그림 4 LCL 유형 인버터의 등가 회로

Fig. 4. Equivalent circuit of the LCL-type

여기서 ϕ_n 는 위상 보상 각이며, Zero Order Hold (ZOH) 효과와 연산 지연을 고려하여 일반적으로 $1.5h\omega_e T_{samp}$ 로 선정한다. (2)의 고조파 전류 제어기는 고차 고조파 전류 제어에 대해 상당히 견고한 특성을 보이기 때문에 대용량 APF에 유용하게 적용할 수 있다.

B. 스위칭 리플 저감용 출력 필터

PWM 컨버터의 종류 중 하나인 APF는 스위칭 동작으로 인한 리플을 줄이기 위해 출력 필터가 필요하다. 고차 감쇠 특성을 갖는 LCL 필터는 L 필터에 비해 작은 인덕턴스라도 우수한 스위칭 리플 감쇠 성능을 달성할 수 있어 산업계에서 주로 사용된다. 그러나, LCL 필터에 존재하는 공진 현상은 고조파 전류 제어를 더욱 어렵게 만들기 때문에 고난도의 제어 기법이 요구된다.

그림 4와 같이 LCL 필터는 전류 제어를 위해 측정할 수 있는 전류가 인버터 측과 계통 측 두 가지가 존재하는데, 인버터 측 전류 제어는 추가적인 인버터 보호용 전류 센서가 필요하지 않아 경제적이고, 전류 제어 루프 자체에 존재하는 고유 감쇠 항이 존재하여 계통 측 전류 제어에 비해 안정적인 특성을 보인다^[5]. 그러나, 이러한 장점이 있음에도 불구하고 인버터 측과 계통 측 전류는 커패시터 전류 루프로 인해 차이가 발생하며, 그 차이에 대한 전달 함수는 다음과 같다.

$$D_{LCL}(s) = \frac{I_{gs}}{I_{is}} = \frac{sC_f R_d + 1}{s^2 L_{gs} C_f + sC_f R_d + 1} \quad (3)$$

대용량 APF의 경우 스위칭 리플의 충분한 감쇠를 위해 LCL 필터의 공진 주파수가 낮게 설계되기 때문에 (3)의 공진 주파수 또한 낮아지게 된다. 이에 따라 APF가 인버터 측 고조파 전류를 정확하게 제어하더라도, 부정확한 고조파 전류가 공급되어 계통 고조파 왜곡을 정확하게 보상할 수 없다. 따라서, 인버터 측 전류 제어를 통해 고조파 전류를 제어할 때 (3)의 차이를 고려하여 고조파 전류를 제어해야 한다. 본 논문에서는 이러한 전류의 차이를 고려하여 고조파 전류를 제어하여, 계통 고조파 왜곡을 효과적으로 보상하였다.

V. 축소 모델 실험 결과

본 논문에서는 제안하는 방법의 적용에 따른 고조파 왜곡 보상 성능 검증을 위해 축소 모델 검증을 수행하였으며, 정상상태 동작 조건에서 전해조가 선형 저항 부하 특성을 보인다는 연구 결과를 바탕으로 다이오드 정류기의 직류단에는 전해조 대신 저항을 연결하여 실험을 진행하였다^[1]. 축소 모델 실험에 사용된 파라미터는 표 1과 같으며, 대용량 시스템을 모의하기 위해 스위칭 주파수는 4.2kHz로 낮게 선택되었다. 정격 부하 조건에서 고조파 전류를 수행하지 않으면, 계통 전류의 총 고조파 왜곡 (Total Harmonic Distortion: THD)은 24.1%이다. 고조파 전류만을 수행하면 그림 5와 같이 계통

표 1 축소 모델 실험에 사용된 시스템 제정수 값

Table 1 System parameter values for a small scale experiment

정격 전력	3.8 kVA	Lis	3 mH
계통 전압	220 V	Lgs	1 mH
계통 주파수	60 Hz	Cf	10 μ F
스위칭 주파수	4.2 kHz	Rd	3.3 ohm
샘플링 주파수	8.4 kHz	제어 전류 차수	$\sum_{n=1}^4 6n \pm 1$

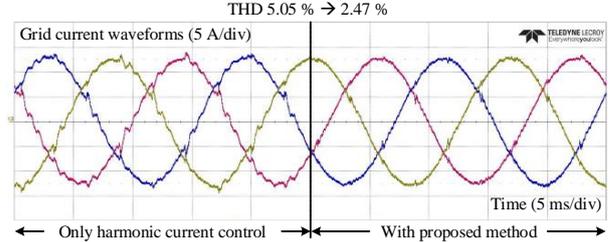


그림 5 제안하는 방법에 따른 정상상태 계통 전류 파형

Fig. 5. Steady-state grid current waveforms according to the proposed method applied

전류가 어느 정도 정현파에 가까워지지만, THD는 5.05%로 국제 표준 기준인 5%를 초과한다. 반면에 (3)의 전류 차이를 고려하여 고조파 전류 제어를 수행하면 THD가 2.47%로 고조파 전류만을 수행하였을 때 보다 2배 정도 개선되며, 국제 표준 기준을 만족함을 확인할 수 있다.

VI. 결론

단방향 전력 전달을 필요로 하는 수전해 시스템의 경우 다이오드 정류기의 사용은 비용, 신뢰성 측면에서 매우 효과적이지만, 전력 전달 과정에서 고조파 전류를 방출하기 때문에 이를 해결하기 위한 방법이 필요하다. 이러한 문제는 APF를 PCC에 병렬로 연결하여 고조파 전류를 효과적으로 보상함으로써 해결할 수 있다. 본 논문에서는 대용량 수전해 시스템의 APF 제어 성능을 개선하기 위한 방법을 제안하고, 축소 모델 실험을 통해 검증하였다.

본 연구는 한국전력 전력연구원의 지원으로 수행되었음 (과제번호 CX71220054).

참고 문헌

- [1] J. Koponen, V. Ruuskanen, A. Kosonen, M. Niemela, and J. Ahola, "Effect of converter topology on the specific energy consumption of alkaline water electrolyzers," IEEE Trans. Power Electron., vol. 34, no. 7, pp. 6171-6182, Jul. 2019.
- [2] A. Weiß, A. Siebel, M. Bernt, T.-H. Shen, V. Tileli, and H. A. Gasteiger, "Impact of Intermittent Operation on Lifetime and Performance of a PEM Water Electrolyzer," J. Electrochem. Soc. 166 F487, 2019.
- [3] B. L. H. Nguyen, M. Panwar, R. Hovsapien, K. Nagasawa, and T. V. Vu, "Power converter topologies for electrolyzer applications to enable electric grid services," in Proc. 47th Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc., 2021, pp. 1-6.
- [4] A. G. Yepes, F. D. Freijedo, Ó. Lopez, and J. Doval-Gandoy, "Analysis and design of resonant current controllers for voltage-source converters by means of nyquist diagrams and sensitivity function," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 58, no. 11, pp. 5231-5250, Nov. 2011.
- [5] Z. Xin, P. Mattavelli, W. Yao, Y. Yang, F. Blaabjerg, and P. C. Loh, "Mitigation of grid-current distortion for LCL-filtered voltage-source inverter with inverter-current feedback control," IEEE Trans. Power Electron., vol. 33, no. 7, pp. 6248-6261, Jul. 2018.