

이동식 에너지뱅크용 대용량 배터리 충전 시스템의 개발

Development of the High Power Battery Charging System for Portable Energy Banks

김수연¹, 김동옥², 이정환³, 박성준^{4*}

Soo-Yeon Kim¹, Dong-Ok Kim², Jung-Hwan Lee³, Sung-Jun Park^{4*}

〈Abstract〉

Batteries are widely used for energy storage, such as ESS(Energy Storage System), electric vehicles, electric aircraft, and electric powered ships. Among them, a submarine uses a high power battery for an energy storage. When the battery of a submarine is discharged, a diesel generator generates AC power, and then AC/DC power converter change AC power to DC power for charging the battery. Therefore, in order to lower the current capacity of the diesel generator, it is necessary to use an AC/DC converter with a high input power factor. And, a power converter with a large power capacity must have high stability because it can lead to a major accident when a failure occurs. However, the control algorithm using the traditional PI controller is difficult to satisfy stability and dynamic characteristics. In this paper, we design the high power AC/DC converter with high input power factor for battery charging systems. And, we propose a stable control algorithm. The validity of the proposed method is verified through simulation and experiments.

Keywords : AC/DC Converter, Battery Charger, PI controller, Variable gain

1 주저자, 전남대학교 전기공학과, 박사과정
E-mail: rlatndus3113@naver.com

2 전남테크노파크 국가혁신클러스터지원센터, 센터장
E-mail: dongok7@jntp.or.kr

3 호남대학교 미래자동차공학부, 조교수
E-mail: jhlee@honam.ac.kr

4* 교신저자, 전남대학교 전기공학과, 교수
E-mail: sjpark1@jnu.ac.kr

1 Main Author, Dept. of Electrical Engineering, Chonnam University, Ph.D. Candidate.

2 National Innovation Cluster Support Center, Jeonnam Technopark, Director.

3 Dept. of Automotive Engineering, Honam University, Assistant Professor.

4* Dept. of Electrical Engineering, Chonnam National University, Professor.

1. 서론

배터리는 에너지저장수단으로 ESS(Energy Storage System), 전기자동차, 전기항공기, 전기추진선박 등에 널리 사용되고 있다. 그 중에서도 잠수함은 대용량 배터리를 사용한다. 잠수함은 배터리가 방전되면 디젤 발전기를 통해 AC 전력을 발생시킨 후, AC/DC 전력변환장치를 통해 배터리를 충전시키는 방식을 사용한다. 디젤 발전기의 전류 용량을 낮추기 위해서는 AC/DC 컨버터의 입력 역률과 THD(Total Harmonic Distortion)가 높아야 하며, 대용량을 가지는 전력변환장치는 고장 발생 시 큰 사고로 이어질 수 있기 때문에 안정성이 높아야 한다.

배터리 충전기를 위한 제어기는 일반적으로 선형제어기인 비례적분(PI)제어기가 주로 사용된다 [1-2]. PI 제어기는 구조가 간단하고 구현이 쉬운 장점을 가지지만 무부하 상태에서는 DC/DC컨버터의 출력 LC필터 특성으로 인해 낮은 안정성을 가진다. 이로 인해 제어기 이득에 제한이 걸리고, 낮은 이득은 제어기의 속응성을 느리게 하여 동특성이 떨어지게 된다. 이를 보완하기 위해 LC 필터에 댐핑 저항 또는 더미부하를 장착하기도 하지만, 이는 시스템의 효율을 감소 시킨다[3-6]. 따라서 안정성과 동특성을 모두 만족하면서, 높은 효율을 가지는 배터리 충전 시스템 설계하기 위해서는 새로운 방식의 제어기가 필요하다.

본 논문에서는 대용량 배터리 충전기를 개발하기 위한 설계와 안정성을 높이기 위한 개선된 충전 제어 알고리즘을 제안한다. 개발된 전력변환장치는 높은 입력 역률을 가지고 대전류 배터리 충전기에 적합하게 설계되었다. 또한, 기존 PI제어에 제안하는 여러 보상함수를 추가하여 제어 안정성을 높였다. 마지막으로, 제안된 방식의 타당성은 시뮬레이션 및 실험을 통하여 검증한다.

2. 대용량 배터리 충전기

2.1 AC/DC 정류기

3상 다이오드 정류기는 현재 산업현장에서 가장 널리 사용하고 있지만 입력 전류에 저차 고조파가 크게 포함되는 문제를 갖고 있다. 특히, 대전력이 사용되는 대형선박의 전기추진시스템에서는 고조파에 의한 여러 가지 심각한 상황을 초래할 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 기존의 AC/DC 정류기인 6펄스 다이오드 정류기의 제어응답성, 입력전류의 THD, 입력역률 등을 개선

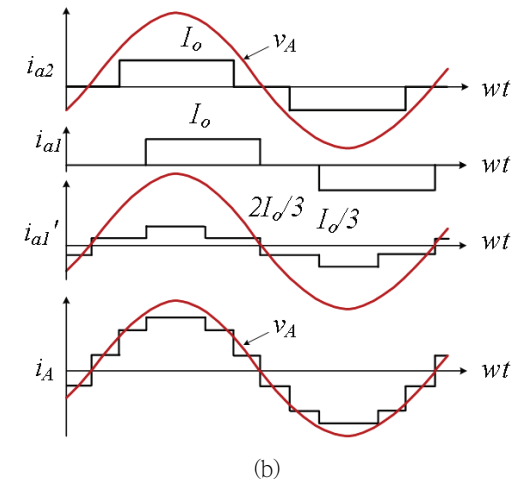
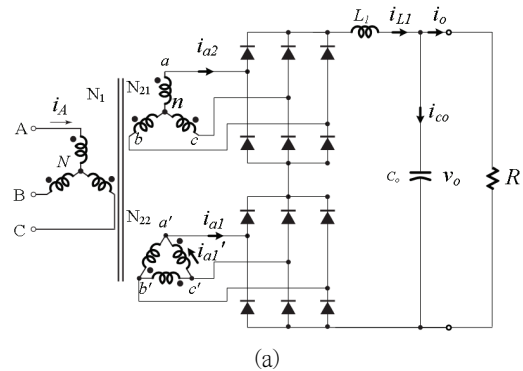


Fig. 1 12-pulse diode rectifier

할 목적으로 12펄스 다이오드 정류기를 많이 채용하고 있다.

그림 1(a)는 12펄스 다이오드 정류기를 나타낸다. 12펄스 다이오드 정류기는 6펄스 다이오드 정류기 2개를 직렬로 연결하여 사용하며, 정류기 입력단에 두개의 변압기뱅크가(Y-Y 결선 및 Y-△ 결선) 한 쌍의 브릿지에 전원을 공급하도록 사용된다. 그림 1(b)는 12펄스 다이오드 정류기의 입력 전류 파형을 나타낸다. 12펄스 다이오드 정류기 입력전류에 대한 푸리에 급수를 전개하면 식 (1)과 같다. 또한 12펄스 다이오드 정류기의 평균 전압은 식 (2)와 같다.

$$I_n = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{4\sqrt{3}}{\pi} I_o \left[\frac{1}{mP \pm 1} \sin(mP \pm 1)\omega t \right] \quad (1)$$

$$V_{dc} = \frac{6V_l}{\pi} = 1.91V_l \quad (2)$$

한 브릿지에 공급되는 삼상 전압은 다른 브릿지에 공급되는 삼상전압과 위상각이 30° 차를 가진다. 또한, 12펄스 위상제어 정류기가 6펄스 위상제어 정류기에 비하여 입력 전류파형이 정현파에 더 가까운 것을 알 수 있다. 따라서, 교류전원측의 제 5 및 7 고조파가 효율적으로 제거되어 고조파 제거를 위한 필터 설치비용이 상당히 감소된다. 추가적으로 12펄스 브릿지에서는 DC 전압 리플이 감소되고 제 6, 18 고조파가 제거된다. 즉, 6펄스 브리지에서는 직류 측에 6의 배수들의 고조파가 발생하는데 반하여, 12펄스 브리지는 단지 12배수들의 고조파만이 발생한다. 12펄스 위상제어 정류기를 사용할 경우 입력전류 THD는 10%, 입력역률은 0.9까지 상승시킬 수 있으며, 별도의 필터를 장착하여 5%이내로 설계한다.

본 연구에서는 대용량 배터리 충전장치를 개발하기 위하여 입력측 역률 및 THD 개선 효과가 큰 12펄스 정류기 시스템을 도입하고, 충전전압은

별도의 감압 컨버터를 사용하는 배터리 충전장치를 개발한다.

2.2 DC/DC 컨버터

전력변환기 대용량화를 위한 병렬 운전에는 크게 그림 2와 같이 전압공유방식과 전류공유방식으로 구분할 수 있다. 그림 2(a)는 전압공유 병렬

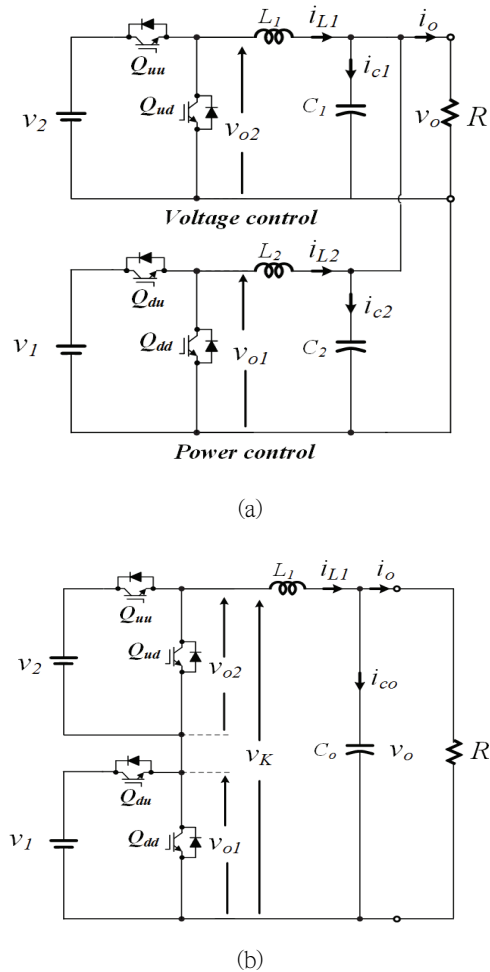


Fig. 2 DC/DC converter configurations for the parallel operation (a) voltage sharing type (b) current sharing type

운전용 DC/DC 컨버터를 나타내며, 전류용량을 크게 하여 전력변환기의 용량을 증대시키는 방식이다. 그림 2(b)는 전류공유 병렬 운전용 DC/DC 컨버터를 나타내며, 전압용량을 크게 하여 전력변환기의 용량을 증대시키는 방식이다. 본 연구에서 개발할 배터리 충전기의 최대 전압은 1000[V]이 하이기 때문에, 대용량화를 위해서는 그림 2(a)와 같은 전압공유방식이 타당하다.

그림 3은 본 논문에서 대용량 배터리 충전기를 개발하기 위해 구성된 4 병렬 인터리브드 DC/DC 컨버터 구조를 나타낸다. 그림 3을 통해 알 수 있듯이 인덕터, 스위치는 병렬로 연결된 형태이지만

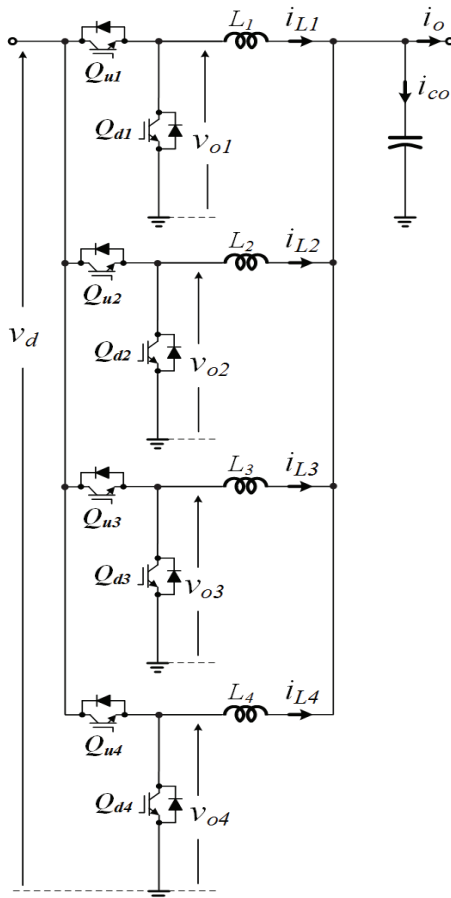


Fig. 3 The 4-parallel interleaved DC/DC converter for high power capacity

출력 커패시터는 공통으로 사용한다. 다상 감압 컨버터는 단일 감압 컨버터의 병렬제어로서 정의할 수 있으며, 인터리브드 방식으로 제어하여 입력전압을 감압한다. 여기서 인터리브드 방식이란 병렬로 연결된 단일 감압 컨버터의 개수(N)에 따라 스위칭 신호를 생성하는 기준파(Carrier wave)를 $360^\circ/N$ 만큼 위상 지연을 가지고 동일한 스위칭 주파수를 가지는 신호로 스위칭 하는 방식을 말한다.

다상 감압 컨버터는 입력전류가 병렬 연결된 단일 감압 컨버터에 각각 분배되기 때문에 소자의 전류정격 및 전류 스트레스를 줄일 수 있다. 또한 입력전류는 각각의 단일 감압 컨버터의 입력전류가 중첩되어 나타나기 때문에 입력전류 리플을 저감할 수 있고, 그에 따른 출력전압 리플을 저감할 수 있다. 인덕터의 용량은 1/2배로 줄어들게 되어도 단상 감압 컨버터와 같은 입력전류 리플크기를 얻을 수 있고 특정 시비율(Duty)에서는 단상 감압 컨버터의 입력전류 리플크기보다 더 작은 입력 전류 리플크기를 얻을 수 있다. 단상 감압 컨버터는 입력전류 리플과 출력전압 리플이 선형적으로 증가하는 반면 인터리브드 방식 또는 다상화 되었을 때는 특정 듀티에서 입력전류 리플과 출력전압 리플이 거의 없는 특성도 있다. 듀티에 따른 컨버터의 출력 특성은 단일 감압 컨버터의 특성과 동일하다. 그림 4는 2상 인터리브드 컨버터의 스위칭 신호에 따른 인덕터 전류 리플을 나타낸다.

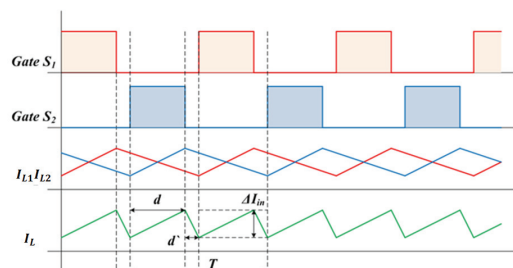


Fig. 4 An inductor current ripple of 2-phase interleaved converter

다상컨버터에서 1/N 구간에 해당되는 듀티에서 전류리플이 0이 된다. 예를 들어 2상인 경우는 D=0.5일 때 영 전류 리플을 갖게 되고, 3상인 경우는 D=0.33, D=0.66 일 때 영 전류 리플을 가지게 된다. 그리고, 4상인 경우는 D=0.25, 0.5, 0.75일 때 영 전류 리플이 나타난다.

그림 4는 2상 인터리브드인 경우의 인덕터 전류를 나타낸다. 두 게이트 신호 S_1 과 S_2 는 180도의 위상차를 가짐으로써 각 상의 리플 성분이 서로 상쇄되어 출력 리플이 감소하게 됨을 알 수 있다.

2.3 배터리 충전 제어 알고리즘

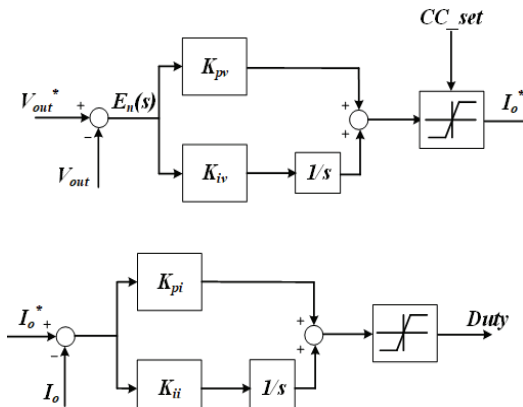


Fig. 5 Conventional PI controller for Battery chargers

그림 5는 배터리의 충전을 위해 사용 되는 일반적인 CC/CV(Constant current/Constant voltage) 제어 알고리즘을 나타낸다. 안쪽 루프(Inner loop) 제어기는 전류제어를 나타내며, 바깥쪽 루프(Outer loop)는 전압제어를 나타낸다. 전압 및 전류제어기를 일반적으로 비례적분(PI)제어기가 가장 널리 사용되고 있다. 전압제어기의 전압 지령치는 충전을 위한 배터리의 최대전압으로 셋팅되고, 전압제어의 출력은 안쪽루프의 전류제어기 지령치로

사용된다. 이때, CC모드의 전류는 전류 지령 리미터(CC_set)에 의해 충전 전류를 제한할 수 있다.

일반적인 비례적분제어기는 부하전류가 큰 경우에는 안정적으로 제어 되지만, 부하가 작아 컨버터의 리액터 전류가 불연속인 경우에는 제어의 안정성이 불안해지는 경우가 종종 발생한다. 부하가 적은 경우 인덕터의 불연속 전류로 인하여 시스템 안정화를 위해서는 제어기 이득을 높일 수가 없다. 이러한 제어기의 낮은 이득은 제어기의 속응성을 느리게 하고, 부하변동과 같은 동특성이 낮은 문제를 가지게 된다. 따라서 시스템의 안정성과 동특성을 만족시키기 위해 더미부하를 장착하는 경우가 일반적이다. 이러한 더미부하는 시스템의 안정성과 동특성을 개선할 수 있으나, 저항으로 인하여 손실이 증가하여 시스템 효율을 저감시키는 단점이 있다.

시스템의 동특성을 개선하면서 부하가 적은 경우에도 안정화를 유지하기 위해서는 부하에 따른 가변이득 제어 구조가 필요하다. 본 논문에서는 선형 함수와 3제곱 함수를 사용한 예러 보상기 함수를 제안하며, 이를 통해 가변이득 제어 구조를 구현 할 수 있다.

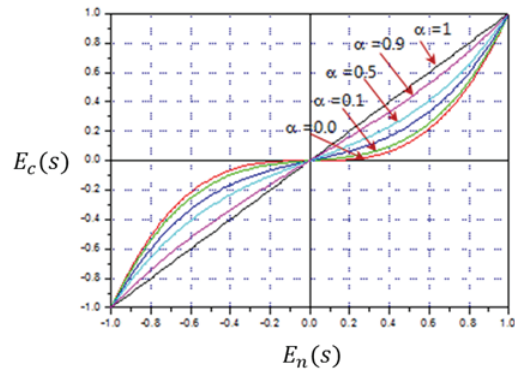


Fig. 6 Proposed linear-cube error compensation

그림 6은 제안된 예러 보상기 함수를 나타낸다. 전압제어기의 예러 $E_n(s)$ 는 식 (3)과 같으며, PI제

여기의 입력으로 사용된다.

$$E_n(s) = V_{out}^* - V_{out} \quad (3)$$

$E_c(s)$ 는 $E_n(s)$ 를 제안된 함수를 통해 정규화된 에러를 의미한다. 제안된 에러 보상기 함수는 식 (4)에 나타내었다.

$$E_c(s) = \alpha E_n(s) + (1-\alpha)E_n^3(s) \quad (\alpha: \text{근접도 계수}) \quad (4)$$

식 (4)는 1차 선형 함수와 3차 함수로 이루어져 있으며, 근접도 계수 α 에 의해 그 특성이 달라진다. 근접도 계수 α 는 1에 가까울수록 식 (5)와 같이 1차 선형 함수가 되고, 0에 가까울수록 식 (6)과 같이 3차 함수가 된다. 즉, 그림 6을 통해 알 수 있듯이 3차 함수에 가까울수록 에러가 적은 영역에서는 제어기 이득이 적게 되는 구조가 되어 경부하에서 응답특성은 늦어지게 되지만, 안정도가 증가하는 특성을 가진다. 그림 7은 제안된 에러 보상기 함수를 적용한 대용량 배터리 충전기를 나타낸다.

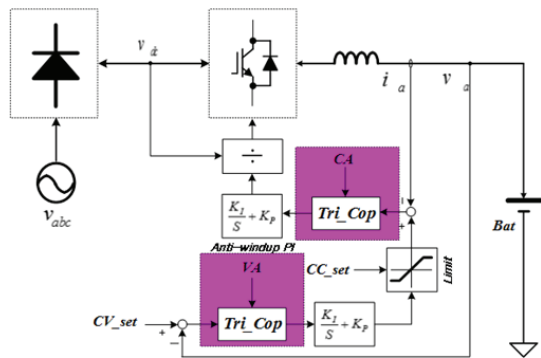


Fig. 7 Proposed PI controller with the linear-cube error compensation

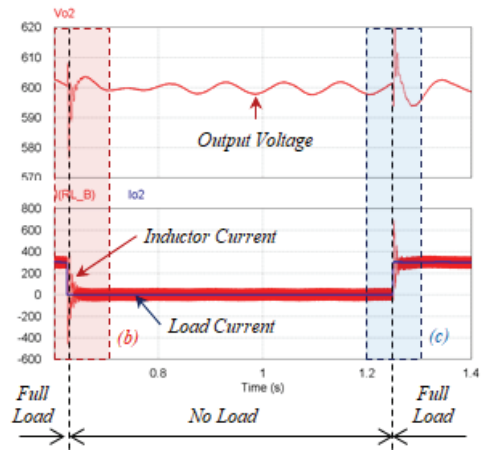
$$E_c(s) = E_n(s) \quad (\alpha = 1) \quad (5)$$

$$E_c(s) = E_n^3(s) \quad (\alpha = 0) \quad (6)$$

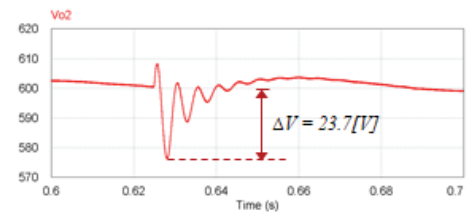
3. 시뮬레이션 및 실험 결과

3.1 시뮬레이션 결과

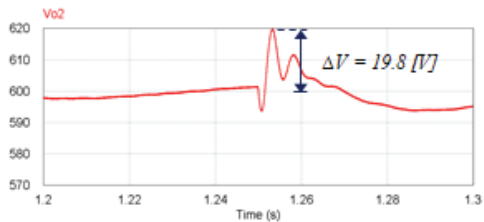
그림 8은 기존의 PI제어기를 사용한 경우, 부하



(a)



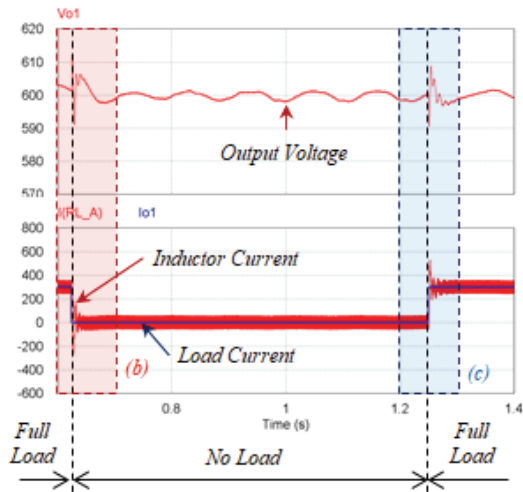
(b)



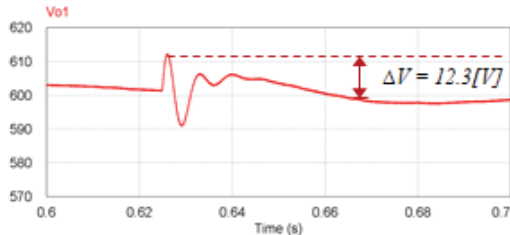
(c)

Fig. 8 Dynamic characteristic of conventional PI controller (a) output voltage and current according to load change (b) full-load to no-load (c) no-load to full-load

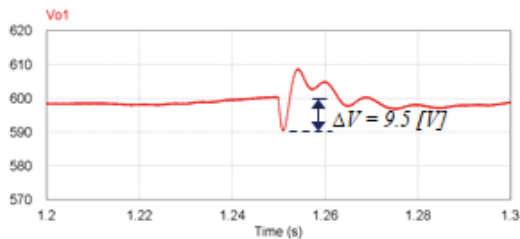
변동에 따른 출력전압 변동 특성을 나타낸다. 전압 지령치는 600[V]이며 전부하(100%)상태에서



(a)



(b)



(c)

Fig. 9 Dynamic characteristic of proposed PI controller with the linear-cube error compensation (a) output voltage and current according to load change (b) full-load to no-load (c) no-load to full-load

무부하(0%)로 부하변동을 주고, 다시 무부하(0%)에서 전부하(100%)로 부하를 가변하여 제어기의 동특성을 확인하였다.

그림 9는 제안된 예러 보상 제어기에 의한 시뮬레이션 파형이다. 전부하에서 무부하로 변동될 때의 오버슈트(ΔV)는 기존의 PI제어기는 약 4%인 23.7 [V]로 나타났고, 제안된 예러 보상 제어기는 약 2.1%인 12.3 [V]로 나타났다. 또한 무부하에서 전부하로 가변한 경우의 오버슈트는 기존의 PI제어기는 약 3.2%인 19.8 [V]이며, 제안된 예러 보상 제어기는 약 1.6%인 9.5 [V]로 나타났다. 제안된 방식을 사용한 경우 전부하 변동에서 2.1%이내의 전압변동을 확인할 수 있었다. 제안된 제어기를 사용할 경우 전부하에서 무부하 변동 시에는 51.9%, 무부하에서 전부하로 변동 시에는 48.0%로 오버슈트의 크기가 감소함을 시뮬레이션 결과를 통해 알 수 있다.

그림 10은 4상 인터리브드 컨버터의 각 인덕터 전류를 나타낸다. 각 전류 리플은 90°의 위상차를 가지며, 각 인덕터가 동일하게 출력전류를 분담하고 있음을 알 수 있다.

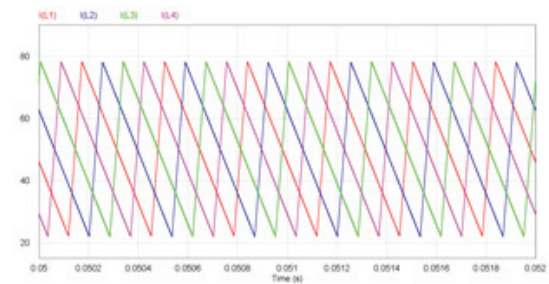


Fig. 10 Inductor currents of 4-parallel interleaved converter

3.2 실험 결과

그림 11은 대용량 충전시스템의 전체 구성을

나타낸다. 크게 12펄스 다이오드 정류기와 변압기, DC/DC컨버터용 IGBT 스택, LC필터, 수냉시스템 그리고 컨트롤 보드로 구성되어 있다. 그림 12는 변압기 입력측 전압과 전류 파형을 나타낸다. 전압 전류파형이 동상에 가까움을 알 수 있다.

그림 13과 14는 CV제어를 하는 경우, 각각 무부하에서 전부하상태로 변동하였을 때의 정착시간과 전압변동을 나타낸다. 제어기는 그림 7의 제안된 에러 보상함수를 추가한 CC/CV 알고리즘을 사용하였다. 대용량 충전시스템의 개발 조건은 전압 변동률은 정격 전압의 20 [%]이내이며, 정착시간은 200 [ms]이내이다. 그림 13, 14를 통해 알 수 있듯이 정착시간은 131 [ms], 전압 변동은 63.2 [V]로 측정되어 개발 조건 이내에서 정상 동작함을 확인하였다. 그림 15와 16은 전부하상태에서 무부하 상태로 변동할 때의 정착시간과 전압변동을 나타낸다. 앞 장에서 설명하였듯이, 무부하 조건에서 시스템은 낮은 안정성을 가진다. 그림

15, 16을 통해 알 수 있듯이 정착시간은 104 [ms], 전압 변동은 67.2 [V]로 측정되어 시스템이 안정함을 보이고, 개발 조건 이내에서 정상 동작

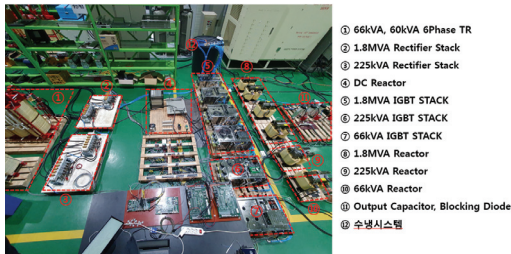


Fig. 11 Configuration of high power battery charger

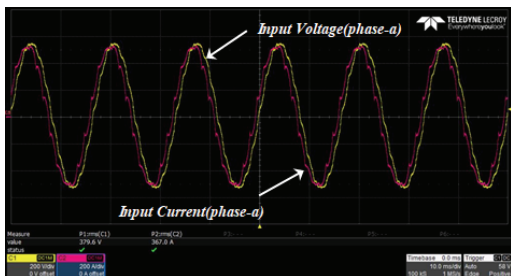


Fig. 12 Input voltage and current waveforms of phase-a

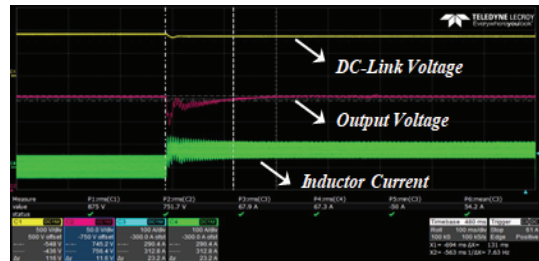


Fig. 13 settling time of output voltage (no-load to full-load)

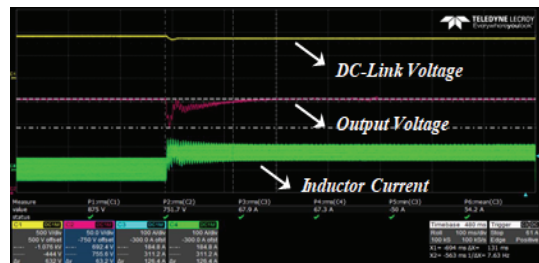


Fig. 14 output voltage drop (no-load to full-load)

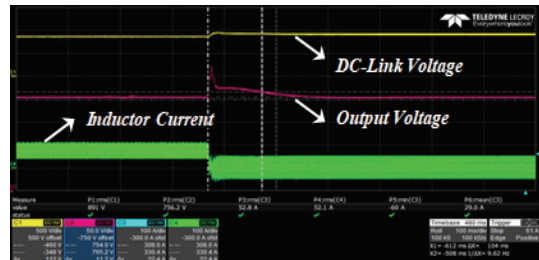


Fig. 15 settling time of output voltage (full-load to no-load)

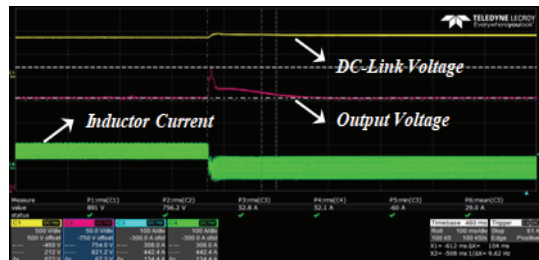


Fig. 16 output voltage drop (full-load to no-load)

함을 확인하였다. 따라서, 제안된 에러 보상기를 이용한 가변이득 PI제어 구조를 통해 동특성을 높이고, 제어 안정성을 확보하였음을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 잠수함용 대용량 배터리 충전기를 개발하기 위해 AC/DC 전력변환장치를 설계하였다. 12-펄스 다이오드 정류기를 사용하여 높은 입력 역률을 만족하여 디젤 발전기의 전류 용량을 낮출 수 있었다. 그리고 대전류 시스템에 적합한 4병렬 DC/DC 구조를 채택하였으며, 출력 전류 리플을 저감하기 위해 인터리브드 스위칭 기법을 적용하였다. 또한, 충전 시스템의 안정성을 높이기 위해 기존 PI제어기에 에러 보상 함수를 제안하여 가변이득 제어 구조를 구현하여 시스템의 안정성을 높였다.

시뮬레이션 및 실험 결과를 통해 개발된 대용량 충전 시스템의 우수성과 안정성을 검증하였다.

사 사

본 연구는 2021년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20214000000560)

참고문헌

- [1] H. G. Jeong and K. B. Lee, "A Controller Design for a Stability Improvement of an On-Board Battery Charger," *Journal of Electrical Engineering and Technology*, vol. 8, no. 4, pp. 951–958, Jul. 2013.
- [2] Y. Sun, L. Ma, D. Zhao, S. Ding, "A Compound Controller Design for a Buck Converter," *Energies*, vol. 11, no. 9, pp. 2354, 2018.
- [3] Sujata Verma, S.K Singh and A.G. Rao "Overview of control Techniques for DC-DC converter", *Research Journal of Engineering Sciences*, Vol 12, 2013.
- [4] J. Chen, Y. Hwang, J. Liou, Y. Ku and C. Yu, "A New Buck Converter With Optimum-Damping and Dynamic-Slope Compensation Techniques," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 3, pp. 2373–2381, March 2017.
- [5] Alzola RP, Liserre M, Blaabjerg F, Sebastian R, Dannehl J, Fuchs FW (2013) Analysis of the passive damping losses in LCL-filter-based grid converters. *IEEE Trans Power Electron* 28(6): 2642–2646.
- [6] Beres RN, Wang X, Blaabjerg F, Liserre M, Bak CL (2016) Optimal design of high-order passive-damped filters for grid-connected applications. *IEEE Trans Power Electron* 31(3):2083–2098

(접수: 2021.06.30. 수정: 2021.07.16. 게재확장: 2021.07.21.)