

Original Article

OWC 파력발전용 전력변환장치의 빠른 동특성을 위한 모델 예측 전류 제어 기법에 관한 연구

노 찬¹ · 최중수² · 곽상신³ · 김경환^{4,†}

¹한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 해양플랜트·에너지연구본부 연구원

²한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 해양플랜트·에너지연구본부 책임연구원

³중앙대학교 전자전기공학과 교수

⁴한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 해양플랜트·에너지연구본부 선임연구원

A Study on Model Predictive Current Control Method of Power Converter for Fast Dynamics Response in OWC Wave Energy Converter

Roh Chan¹, Jong-Su Choi², Sang-Shin Kwak³, and Kyong-Hwan Kim^{4,†}

¹Researcher, Offshore Plant and Marine Energy Research Division, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Daejeon 34103, Korea

²Principal Researcher, Offshore Plant and Marine Energy Research Division, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Daejeon 34103, Korea

³Professor, Department of Electrical and Electronics Engineering, Chung-ang University, Seoul 06974, Korea

⁴Senior Researcher, Offshore Plant and Marine Energy Research Division, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Daejeon 34103, Korea

요 약

전력변환장치를 이용한 제어는 빠른 응답을 얻을 수 있기 때문에 최근에 연구가 많이 되고 있다. 하지만 기존에 파력발전용 전력변환장치 제어를 위한 비례적분제어(Proportional Integral control, PI-Control) 기반의 펄스폭변조기법(Pulse Width Modulation, PWM)은 입력 에너지가 수초단위로 변화하는 파랑에너지 특성상 빠른 과도 응답을 얻기가 어렵다. 매 샘플링 스텝마다 최적의 스위칭 상태를 사용하는 것이 아니라 기준 전압 벡터 인근에 위치한 다양한 스위칭 상태를 이용해서 제어하기 때문에 과도 상태가 발생 했을 때 기준 전류를 빠른 시간 안에 추종할 수 없게 한다. 그래서 본 논문에서는 파력발전용 전력변환장치의 모델을 이용한 전류예측제어(Model Predictive Current Control, MPCC)를 통해 빠른 동특성을 갖는 최적제어기법을 제안한다. 제안하는 방법은 전력변환장치의 모델을 통한 다음 스텝의 전류를 예측하고, 예측된 전류와 기준 전류를 이용해 비용 함수(Cost Function)를 구성한 다음 매 샘플링 스텝마다 최적의 스위칭 상태 하나를 선택한다. 기존의 방법처럼 매 샘플링 마다 다양한 스위칭 상태를 사용하는 것이 아닌 기준 전압 벡터와 가장 인접한 최적의 전압 벡터 즉 최적의 스위칭 상태 하나만 사용하기 때문에 빠른 과도 응답을 얻을 수 있다. 제안하는 방법의 제어기 성능을 검증하기 위해 PSIM을 이용해 시뮬레이션을 진행하였고, 기존의 PI기반의 PWM방법(PI-PWM)과 제안하는 방법을 정상상태와 다양한 과도상태 비교 분석을 통해 제안하는 방법의 성능을 입증한다.

Abstract – The control using the power converter for wave power generation has been recently studied because it can obtain a fast dynamic response. However, it is difficult to get a transient response because of the energy characteristic of the wave energy that the conventional pulse-width modulation (PWM) method based on proportional integral control (PI-Control) for controlling the power converter has been widely used. Instead of using the optimal switching state during each sampling step, the control is performed by using various switching states located near the reference voltage vector, so that the reference current can not follow in a short time when the transient state occurs. Therefore, in this paper, Model Predictive Current Control (MPCC) is proposed with fast dynamic

[†]Corresponding author: kkim@kriso.re.kr

characteristics using model of power converter for wave power generation. The proposed method predicts the current of the next step through the model of the power converter, constructs the cost function using the predicted current and the reference current, and selects one optimal switching state during each sampling step. As in the conventional method, instead of using various switching states for each sampling, a fast transient response can be obtained because only one optimal voltage vector is used, that is, the optimal switching state, which is closest to the reference voltage vector. To verify the performance of the proposed method, the simulation is performed through the PSIM and the conventional PI-based PWM method (PI-PWM) and the proposed method demonstrate the performance of the proposed method through comparison of steady state and various transient states.

Keywords: Power Converter(전력변환장치), Oscillating Water Column(진동수주), PI-PWM(비례적분제어기 기반 펄스폭 변조), Model Predictive Current Control(모델예측전류제어), Dynamics Response(동특성 응답)

1. 서 론

지난 10년동안 전기 시장에서 재생에너지를 이용한 발전이 세계적으로 증가하면서 전기 시장의 22.8%의 점유하였다(Rana[2015]). 재생에너지를 이용한 발전에 대한 관심이 증가하면서 해양에너지를 이용한 발전에 대한 관심도 함께 증가했다. 해양 에너지를 이용한 발전시스템은 세계적으로 사용할 수 있고, 자원의 높은 에너지 밀도로 인해 가장 유망한 재생 에너지로 평가받고 있다(Edenhofer *et al.*[2011]). 특히 국토 면적은 좁지만 3면이 바다로 구성되어 있는 한국의 특성상 해양에너지는 유용한 자원이 될 수 있다.

해양에너지 시스템 중에서 파력 발전은 유입되는 파랑에너지를 직선운동, 회전운동, 공기의 유동으로 변환하여 전기에너지를 얻는 재생에너지 시스템이다(Multon[2012]). 파력 발전 장치 중에서 진동수주(Oscillating Water Column, OWC) 시스템은 신뢰성 부분에서 장점을 갖고 있기 때문에 많이 연구되어 왔다(Drew *et al.*[2009]). 상업화를 위해서 발전하고 있는 파력 발전의 특성상 방파제 연계를 통한 가격 저감과 해수 직접적인 접촉이 없어 신뢰성이 높은 OWC 시스템이 최근 몇몇 기업에서 좋은 평판을 얻고 있고, 앞으로 더 많이 연구될 것이다. 그 중에서 Mutriku OWC는 8년이상 1.6GWh의 발전하며 그 안전성을 입증하고 있다.

대부분의 파력발전장치는 다양한 RPM 영역에서 발전이 가능한 영구자석형 동기발전기(permanent magnet synchronous generators, PMSG)를 이용하고 단위 모듈을 배열해서 용량을 형성한다(Zhou *et al.*[2014]). 파력발전장치를 구성하는 하나의 단위 모듈은 저전압/저전력 장치를 이용한 2-레벨 전압형 전력변환장치(Voltage Source Converter, VSC)를 사용한다(Kazmierkowski and Jasinski[2011]). 그리고 Nicolas *et al.*[2017]에 나타난 Wave Dragon MECS 장치처럼 MW급을 위한 구성은 2-레벨 전압형 전력변환장치를 이용한 배열 형태로 나타난다.

초기에는 파력발전의 제어 방안이 기계적 제어(Falcao *et al.*[2012]; Babarit and Clement[2006])와 전기적 제어(Luan *et al.*[2009]; Wang *et al.*[2008])로 구분되었다. 하지만 파랑 에너지 맞게 변화가 빠르고 높은 효율을 얻기 위해서는 기계적 제어보다는 전기적 제어를 선호할 수 밖에 없다. 전기적 제어 중에서도 전력변환장치를 이용한 제어 방법이 제안되었다(Park *et al.*[2016]; Roh *et al.*[2019]). 전력 스위칭 소자를 이용한 전력변환장치는 빠른 응답성과 높은 효

율을 얻을 수 있는 장점이 있다. Park *et al.*[2016]은 2상 회전좌표계에서 D축, Q축 전류제어(Current control)를 통해 파력발전용 전력변환장치를 제어하였고, 전력변환장치의 스위칭을 위해서 공간 벡터변조 (Space Vector Pulse Width Modulation, SVPWM)를 사용하였다. Roh *et al.*[2019]에서는 파력발전용 전력변환장치의 효율을 증가시키기 위해서 Park *et al.*[2016] 처럼 전류제어(current control)는 했지만, 불연속 공간벡터변조(Discontinuous Space Vector Pulse Width Modulation, D-SVPWM)를 사용해서 효율을 향상시켰다. 하지만 입력 에너지의 변화가 수초 단위로 변화하는 파랑에너지의 특성상 기존에 제안되었던 공간벡터변조(Space Vector Pulse Width Modulation, SVPWM)은 빠른 응답을 얻기에는 한계성이 존재한다. 기계적 제어보다는 전기적 제어 방법이 빠른 응답성을 나타내긴 하지만, 기존의 공간벡터변조(SVPWM)방법은 매 샘플링 스텝동안 최적의 스위칭 상태가 아닌 다양한 스위칭 상태를 이용하기 때문에 과도 응답 발생 했을 때 기준 전류를 빠르게 추종할 수 없다. 즉, 빠른 응답성을 갖는 파력발전용 전력변환장치 제어를 위한 최적제어기법이 필요하다.

그래서 본 논문에서는 파력발전용 전력변환장치의 모델을 이용한 예측제어(Model Predictive Current Control, MPCC)를 통해 빠른 동특성을 갖는 최적제어기법을 제안한다. 기존에 파력발전에서 많이 사용한 영구자석형 동기 발전기(PMSG)와 2-레벨 백투백(Back to Back) 컨버터를 이용해서 제어기의 성능 검증을 진행한다. 제안하는 방법은 전력변환장치의 모델을 통한 다음 스텝의 전류를 예측하고, 예측된 전류와 기준 전류를 이용해 비용 함수(Cost Function)를 구성한 다음 매 샘플링 스텝마다 최적의 스위칭 상태 하나를 선택한다. 기존의 방법처럼 매 샘플링 마다 다양한 스위칭 상태를 사용하는 것이 아닌 기준 전압 벡터와 가장 인접한 최적의 전압 벡터 즉 최적의 스위칭 상태 하나만 사용하기 때문에 빠른 과도 응답을 얻을 수 있다. 파력발전 특성상 수초 단위로 입력 에너지가 변화하기 때문에, 빠른 과도 응답을 갖는 제안하는 방법은 파력발전용 전력변환장치를 위한 최적제어기법이 될 것으로 예상된다. 제안하는 방법의 제어기 성능을 검증하기 위해 PSIM을 통해 시뮬레이션을 진행하였고, 기존의 PI기반의 PWM방법(PI-PWM)과 정상상태와 다양한 과도상태 비교 분석을 통해 제안하는 방법의 성능을 입증한다.

2. 파력발전용 전력변환장치

2.1 파력발전용 전력변환장치 구성

국내에 사용되었던 파력발전용 전력변환장치는 두 가지 종류이다(Roh *et al.*[2019]). 다이오드 소자를 이용한 전력변환장치는 비용이 저렴하고 간단하게 구성할 수 있는 장점은 있지만 제어 범위가 좁고, 파력발전장치 용량에 따라서 제어에 한계가 있기 때문에 본 연구에서는 Fig. 1에 나타난 것처럼 IGBT 스위칭 소자를 이용한 백투백(Back to Back) 전력변환장치를 이용한다.

백투백(Back to Back) 전력변환장치는 발전기에서 출력하는 AC 전력을 DC 전력으로 변환시키는 발전기 측 컨버터와 정류된 DC 전력을 계통에 보내기 위해서 AC 전력으로 변환시키는 계통 측 인버터로 구성되어 있다. 발전기에서 생산되는 전력은 재생에너지 특성상 일정한 전압과 일정한 주파수가 아니다. 즉, 발전기의 출력을 계통으로 직접적으로 보내기 어렵기 때문에 일정한 전압과 일정 주파수를 맞춰 계통으로 보내기 위해서 전력변환장치를 이용한다. 백투백(Back to Back)컨버터는 각각의 역할이 분리될 수 있다. 발전기 측 컨버터는 들어오는 전력을 최대 생산하기 위해서 최대 전력 제어(Maximum Power Point Tracking, MPPT) 제어를 이용하고, 계통 측 인버터는 컨버터에서 생산된 전력을 안정적으로 계통으로 보내기 위한 전력 제어를 한다. 다시 말해서 백투백(Back to Back) 컨버터 중에서 발전기 측 컨버터는 변동성이 있는 입력 에너지를 제어하기 위해서 기준 전류 값을 빠르게 추종할 수 있는 제어 방법이 필요하다.

2.2 파랑 에너지의 특성

파랑에너지를 이용하는 파력발전용 전력변환장치는 다른 재생에너지(태양광, 풍력 등) 전력변환장치와는 다른 특성이 필요하다. 파랑에너지는 에너지 변동 주기가 수 초 단위로 변하기 때문에 파력발전용 전력변환장치는 빠른 동적 응답이 필요하다. 빠른 동적 응답을 얻을 수 없으면 MPPT 제어를 위한 최적의 부하를 줄 수 없기 때문에 파력발전장치의 출력 발전량이 감소할 수 밖에 없다. 즉, 파력발전을 구성하는 장치들(진동수주실, 터빈, 발전기, 전력변환장치) 중 입력에너지에 대한 부하는 전력변환장치 밖에 줄 수 없

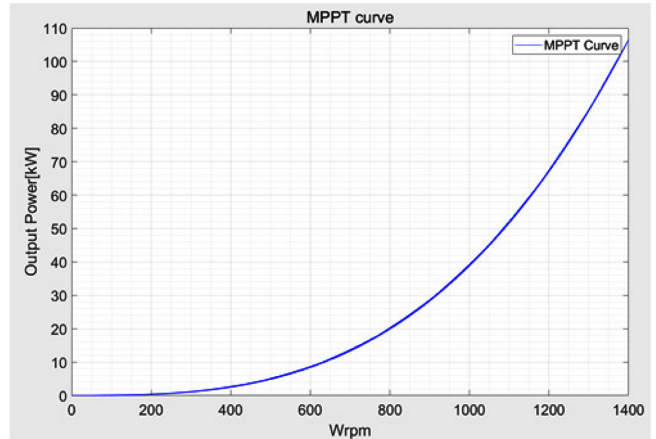


Fig. 2. Graph for maximum power point tracking algorithm (MPPT).

기 때문에 전력변환장치가 빠른 동적 응답성을 가지고 최적의 부하를 주는 것이 파력발전장치의 전체적인 효율을 향상시킬 수 있는 방법이다.

Fig. 2는 입력 RPM에 따라서 기준 출력 값을 결정하는 그래프이다. 입력 RPM에 따라서 발전기 측 컨버터에서 최대 생산할 수 있는 전력 값을 나타낸다. 즉, 입력 RPM이 결정되었을 때 위 그래프에 따른 전력을 출력할 때 최대 전력 제어를 할 수 있는 것이다. 파랑에너지의 특성은 입력 RPM이 짧은 주기로 지속적으로 변동하기 때문에 발전기 측 컨버터에서 최대 출력 제어를 하기 위해서는 급격하게 변화하는 기준 전류를 빠르게 추종해야 한다. 실제 파랑 조건에 따른 RPM 변화와 MPPT 제어를 위한 기준 전류의 변화를 확인을 통해 빠른 동특성의 필요성을 생각할 수 있다.

Fig. 3은 몇 가지 파랑 조건에 따른 발전기 RPM과 최대 전력 제어를 위한 기준 전류를 나타낸다. 파랑에너지는 유의 파고(Hs)와 에너지 주기(Te)를 이용해서 나타낸다. 파랑 에너지의 주기에 따라서 발전기의 RPM도 빠른 주기로 변화하고 이에 따라 기준 전류도 지속적으로 변화한다. 그림 3에 나타난 것처럼 빠르게 변화하는 기준 전류를 발전기 측 컨버터에서 제어하지 못하면 전력변환장치의 효율은 감소될 수 밖에 없다. 이에 따라서 파력발전장치는 최적의 부하로 동작하지 못하기 때문에 전체적인 효율도 감소한다.

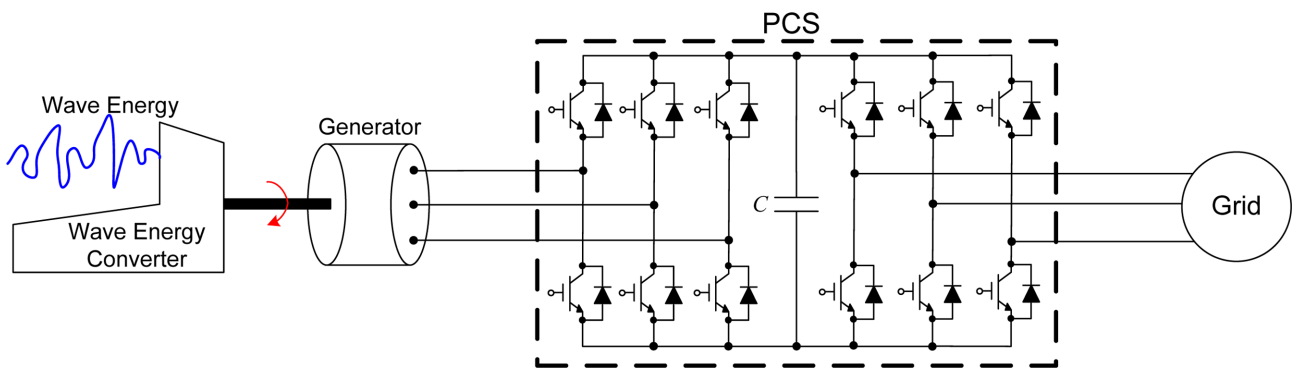
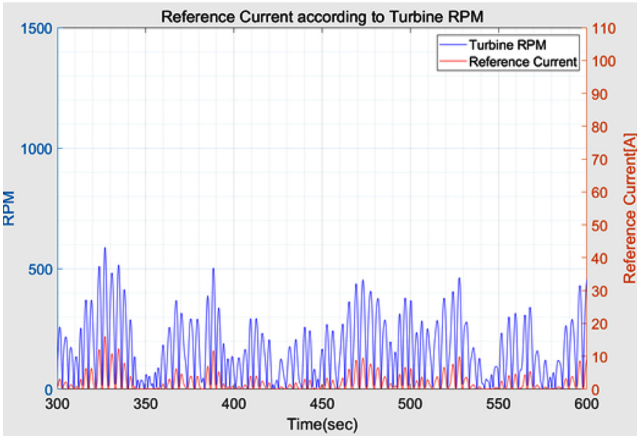
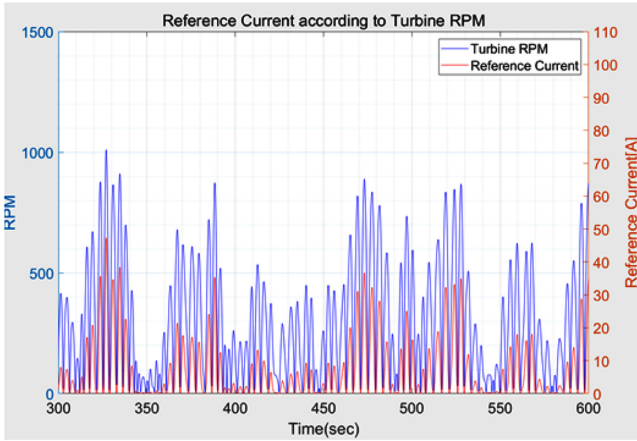


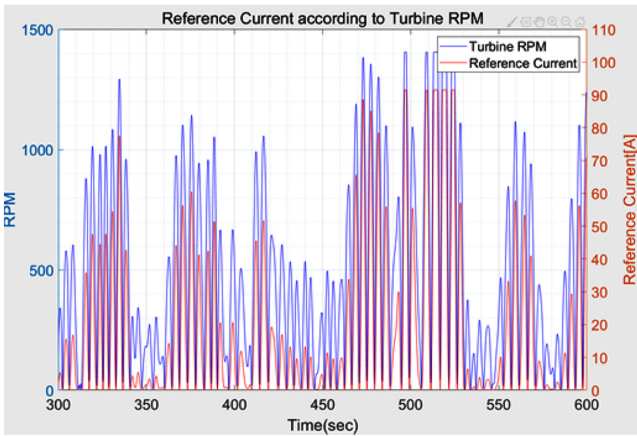
Fig. 1. Construction diagram of back to back power converter for wave power generation.



(a)



(b)



(c)

Fig. 3. Turbine RPM and reference current for maximum power point tracking algorithm according to wave energy conditions: (a) $H_s=0.75$, $T_e=6.25$, (b) $H_s=1.25$, $T_e=6.75$, (c) $H_s=1.75$, $T_e=8.75$.

본 논문은 파랑에너지의 변화에 따른 빠른 동특성 알고리즘을 위한 연구이기 때문에, 파랑 에너지에 변화에 직접적으로 영향을 받는 발전기 측 컨버터를 기반으로 빠른 동특성을 갖는 알고리즘의 성능을 검증한다.

2.3 파력발전용 전력변환장치 제어를 위한 기존 제어 방법 (PI-PWM)

파력발전용 전력변환장치(발전기 측 컨버터)의 제어를 위해서 발전기는 역기전력, 인덕턴스 및 저항 성분을 이용해서 다음 식 (1)-(3)과 같이 미분방정식으로 나타낼 수 있다.

$$v_{a_pcs} = e_{a_gen} + L_{gen} \frac{d}{dt} i_{a_gen} + R_{gen} i_{a_gen} \quad (1)$$

$$v_{b_pcs} = e_{b_gen} + L_{gen} \frac{d}{dt} i_{b_gen} + R_{gen} i_{b_gen} \quad (2)$$

$$v_{c_pcs} = e_{c_gen} + L_{gen} \frac{d}{dt} i_{c_gen} + R_{gen} i_{c_gen} \quad (3)$$

여기서 v_{abc_pcs} 는 전력변환장치의 abc-상 출력전압이고, e_{abc_gen} 는 발전기 abc-상 역기전력이고, L_{gen} 는 발전기의 상인덕턴스, R_{gen} 는 상저항을 나타내고, i_{abc_gen} 는 abc-상전류를 나타낸다. 위 식을 기반으로 발전기의 등가회로는 다음 Fig. 4와 같이 나타낼 수 있다.

발전기 측 컨버터를 제어하기 위해서는 상위제어기는 최대 출력 제어 방법을 적용해서 입력 RPM에 따라서 최대의 전력을 추출하는 기준 전류 값을 선정하고, 하위 제어기는 기준 전류와 실제 전류를 이용한 전류 제어기로 구성한다. 전류 제어기의 출력 값은 전력변환장치 제어를 위한 기준 전압(v_{abc}^*)이 되고 이를 기반으로 전력변환장치를 제어할 수 있다.[13]

시간에 따라서 기준 전압(v_{abc}^*)이 변화하기 때문에 간단하게 전력변환장치 제어기를 구성하기 위해서 식 (4)에 나타난 좌표변환기법을 사용한다.

$$\begin{bmatrix} v_{\alpha}^* \\ v_{\beta}^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_a^* \\ v_b^* \\ v_c^* \end{bmatrix} \quad (4)$$

좌표 변환을 한 기준 전압($v_{\alpha\beta}^*$)는 Fig. 5와 같이 전압 벡터도에 나타낼 수 있다. 기준 전압($v_{\alpha\beta}^*$)는 발전기의 RPM에 따라서 벡터도 상에서 회전하게 되고, 이에 따라서 각 섹터에 할당된 전압 벡터로 기준 전압을 합성할 수 있다. 기준 전압($v_{\alpha\beta}^*$)에 따른 발전기 측 컨버터의 전압 벡터의 조합은 총 6가지이고(6개 섹터로 구성), 각 섹터는 3개의 전압 벡터로 구성된다. 섹터에 따른 전압 벡터 조합은 다음 Table 1에 나타난다.

섹터 1를 이용해서 기준 전압과 전압 벡터 사이에 관계식은 다

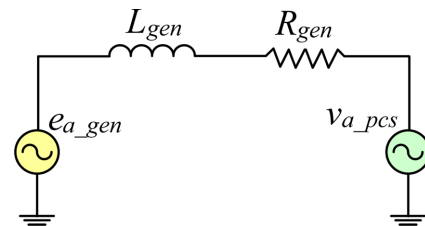


Fig. 4. Equivalent circuit of generator and power converter.

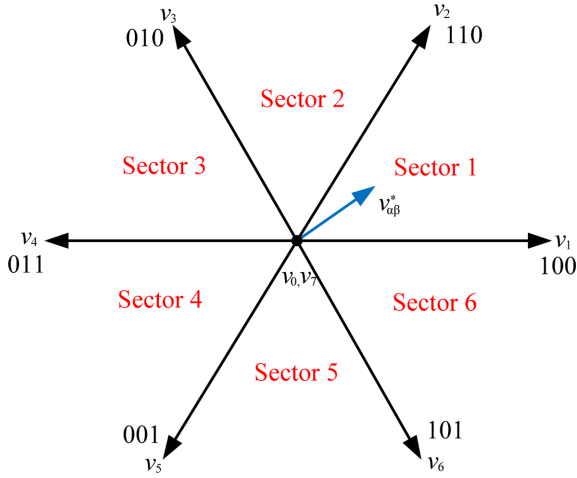


Fig. 5. The voltage vector diagram according to the switching state of the generator side converter.

Table 1. The voltage vector according to the position of the reference voltage vector ($v_{\alpha\beta}^*$)

Sector	Reference Voltage Vector ($v_{\alpha\beta}^*$)
Sector 1	v_1, v_2, v_0
Sector 2	v_2, v_3, v_0
Sector 3	v_3, v_4, v_0
Sector 4	v_4, v_5, v_0
Sector 5	v_5, v_6, v_0
Sector 6	v_6, v_1, v_0

음과 같다.

$$v_{\alpha\beta}^* T_s = v_1 * T_1 + v_2 * T_2 + v_0 * T_0 \quad (5)$$

위에서 설명한 기존의 PI제어기 기반의 PWM 제어 방법(PI-PWM)은 매 샘플링 주기마다 여러 개의 전압 벡터를 사용한다. 이는 정상상태에서는 영향이 없지만 과도상태가 발생했을 때, 여러 개의 전압 벡터를 사용하기 때문에 전류의 응답속도가 느려질 수 있다. 즉, 파력발전과 같이 입력 에너지가 급격하게 변화하는 시스템에는 좋지 않은 영향을 줄 수 있다. 자세한 설명은 다음 장에서 제안하는 알고리즘과 비교를 통해서 설명할 것이다.

3. 동특성 향상을 위한 제어 알고리즘(MPCC)

기존에 많이 사용되고 있는 PI 제어기 기반의 PWM 제어 방법(PI-PWM)은 입력에너지가 급격하게 변화하는 파력발전 특성상 한계성이 존재한다. 파력발전은 파랑에 따라서 수초 단위로 입력 에너지가 변화하기 때문에 발전기 측 컨버터는 최대 전력 제어 방법(MPPT)에 따라서 기준 전류 값을 지속적으로 변화시켜야 한다. 하지만 기준 전류 값을 변화시켰을 때 실제 전류가 기준 전류를 정확하게 추종하기 위해서는 시간이 소요된다. 특히, PI-PWM 방법은 과도 상태가 발생했을 때 기준 전류를 추종하기 위해서 최적의 스위칭 상태만 사용하는 것이 아니라 앞 장에서 설명한 것과 같이 정상상태와 마찬가지로 캐리어 기반의 일정한 PWM 스위칭을 하기 때문에 지연이 더욱 발생하는 것이다. 그래서 본 논문에서는 캐리어 기반의 PWM 스위칭 동작 방법이 아닌 빠른 동특성을 얻기 위한 모델 기반의 예측제어기법(Model Predictive Current Control,

MPCC)을 제안한다. 모델예측제어기법(MPCC)은 현재의 실제 전류 값을 이용해서 다음 샘플링의 전류를 예측하고 이를 예측된 기준 전류와 비교해서 최적의 스위칭 상태를 선택하게 된다. 이는 한 샘플링 시간 동안 PI-PWM 방법처럼 여러 개의 스위칭 상태를 사용하는 것이 아니라 하나의 최적의 스위칭 상태를 선택하기 때문에 빠른 과도 응답을 얻을 수 있다.

3.1 발전기 측 전력변환장치 입력 회로정수

기존 방법(PI-PWM)과 성능 비교를 위해 모델예측제어기법(MPCC)의 구성을 위한 발전기 측 컨버터의 입력 회로 정수를 모델링한다. 상위 제어기는 기존 방법(PI-PWM)과 같이 입력 RPM에 따른 MPPT 방법을 사용한다. 발전기 측 컨버터의 입력 회로정수 모델링을 위해 그림 4와 같이 등가 모델을 구성할 수 있다. 등가 모델은 발전기에 의해서 생성된 역기전력(e_{abc_gen})과 전력변환장치가 만드는 전압(v_{abc_pcs})과 발전기 상인덕턴스(L_{gen})와 상저항(R_{gen}) 그리고 상전류(i_{abc_gen})로 구성된다. 기존 PI-PWM 방법처럼 입력 회로 정수는 키르히호프 전압방정식을 이용해서 식(1)-(3)과 같이 표현될 수 있다.

전류의 미분 항을 오일러 공식을 이용해서 샘플링 타임(T_{sp})을 이용한 이산 모델로 나타내면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d}{dt} i_{abc_gen} = \frac{i_{abc_gen}[k+1] - i_{abc_gen}[k]}{T_{sp}} \quad (6)$$

식 (6)를 이용해서 식 (1)-(3)을 나타내면 다음과 같은 입력 전류 역학 식을 이산시간에서 나타낼 수 있다.

$$v_{a_pcs}[k] = e_{a_gen}[k] + L_{gen} \frac{i_{a_gen}[k+1] - i_{a_gen}[k]}{T_{sp}} + R_{gen} i_{a_gen}[k] \quad (7)$$

$$v_{b_pcs}[k] = e_{b_gen}[k] + L_{gen} \frac{i_{b_gen}[k+1] - i_{b_gen}[k]}{T_{sp}} + R_{gen} i_{b_gen}[k] \quad (8)$$

$$v_{c_pcs}[k] = e_{c_gen}[k] + L_{gen} \frac{i_{c_gen}[k+1] - i_{c_gen}[k]}{T_{sp}} + R_{gen} i_{c_gen}[k] \quad (9)$$

계산의 편리성을 위해서 다음 식 (4)을 이용해서 식 (7)-(9)을 abc- $\alpha\beta$ 변환을 할 수 있다. 변환된 식을 다음 스텝 전류로 나타내면 식 (10)-(11)처럼 나타난다.

$$i_{\alpha_gen}[k+1] = i_{\alpha_gen}[k] + \frac{T_{sp}}{L_{gen}} (v_{\alpha_pcs}[k] - e_{\alpha_gen}[k] - R_{gen} i_{\alpha_gen}[k]) \quad (10)$$

$$i_{\beta_gen}[k+1] = i_{\beta_gen}[k] + \frac{T_{sp}}{L_{gen}} (v_{\beta_pcs}[k] - e_{\beta_gen}[k] - R_{gen} i_{\beta_gen}[k]) \quad (11)$$

그리고, 미래 기준 전류를 계산하기 위하여 라그랑제 외삽법을 사용하면 다음 식 (12)-(13)와 같이 나타낼 수 있다.

$$i_{\alpha}^*[k+1] = 4i_{\alpha}^*[k] - 6i_{\alpha}^*[k-1] + 4i_{\alpha}^*[k-2] - i_{\alpha}^*[k-3] \quad (12)$$

$$i_{\beta}^*[k+1] = 4i_{\beta}^*[k] - 6i_{\beta}^*[k-1] + 4i_{\beta}^*[k-2] - i_{\beta}^*[k-3] \quad (13)$$

식 (10)-(11)과 식 (12)-(13)을 이용해서 비용함수(G)를 최소로 만드는 전압 벡터를 선택해서 발전기측 컨버터의 스위칭 상태를 제어한다. 발전기 측 컨버터 제어를 위한 비용함수는 다음 식 (14)와 같이 나타난다.

$$G = |i_{\alpha,gen}[k+1] - i_{\alpha}^*[k+1]| + |i_{\beta,gen}[k+1] - i_{\beta}^*[k+1]| \quad (14)$$

모델예측제어기법(MPCC)은 한 샘플링 동안 식 (14)에 나타난 목적 함수에 기반해서 최적의 전압 벡터 하나만 선택하기 때문에 빠른 동특성을 얻을 수 있지만, 기존 PI-PWM 방법은 캐리어와 비교해서 스위칭 동작을 하기 때문에 한 샘플링 동안 7개의 전압 벡터 상태를 사용 한다. 다음 장에서 발전기 측 컨버터의 전압 벡터와 스위칭 상태를 이용해서 자세하게 두 방법을 비교할 것이다. 기존에 많이 사용되고 있는 PI-PWM 방법은 입력에너지가 급격하게 변화하는 과력발전 특성상 한계성이 존재한다. 과력에 따라서 수초 단위로 에너지가 변화하기 때문에 과력발전용 전력변환장치는 이에 맞게 적절한 기준 전류 값을 변화시켜야 한다. 하지만 기준 전류 값을 변화시켰을 때 실제 전류가 기준 전류를 정확하게 추종하기 위해서는 시간이 소요된다. 즉, 과도 상태가 발생했을 때 기준 전류를 추종하기 위해서 빠른 스위칭 동작을 하지 못하고 정상상태처럼 일정한 PWM 방법을 기반으로 스위칭하기 때문에 전류 응답에 지연이 발생하는 것이다. 그래서 본 논문에서는 PWM 기반의 스위칭 동작 방법이 아닌 빠른 동특성을 얻기 위해서 모델 기반의 예측제어기법을 제안한다.

3.2 전력변환장치의 전압 벡터와 스위칭 상태

본 연구에서 사용하는 과력발전용 전력변환장치(발전기 측 컨버터)는 2-레벨 컨버터이다. 2-레벨 컨버터는 한 상에서 만들 수 있는

Table 2. Switching state according to voltage vector

Vector	V_a	V_b	V_c	V_{α}	V_{β}	S_a	S_b	S_c
v_0	0	0	0	0	0	0	0	0
v_1	V_{dc}	0	0	$\frac{2V_{dc}}{3}$		1	0	0
v_2	0	V_{dc}	0	$-\frac{V_{dc}}{3}$	$\frac{V_{dc}}{2\sqrt{3}}$	0	1	0
v_3	0	0	V_{dc}	$\frac{V_{dc}}{3}$	$-\frac{V_{dc}}{2\sqrt{3}}$	0	0	1
v_4	V_{dc}	V_{dc}	0	$\frac{V_{dc}}{3}$	$\frac{V_{dc}}{2\sqrt{3}}$	1	1	0
v_5	V_{dc}	0	V_{dc}	$\frac{V_{dc}}{3}$	$-\frac{V_{dc}}{2\sqrt{3}}$	1	0	1
v_6	0	V_{dc}	V_{dc}	$-\frac{2V_{dc}}{3}$	0	0	1	1
v_7	V_{dc}	V_{dc}	V_{dc}	0	0	1	1	1

전압이 V_{dc} 와 0 두 가지 경우만 가능하다. 벡터 상태에 따른 전압 벡터의 크기 및 스위칭 상태는 Table 2에 나타난다.

$S_x(x=a, b, c)$ 는 스위치의 상태를 나타내고 2-레벨 컨버터는 1상이 위쪽과 아래쪽 스위치로 구성되어있고 서로 상보적으로 동작한다. 그래서, $S_x(x=a, b, c)$ 가 1이면 위쪽 스위치가 켜지고 0이면 아래쪽 스위치가 켜진다.

Table 2에 나타난 것처럼 2-레벨 컨버터는 8개의 스위칭 상태를 가진다. 8개의 스위칭 상태는 6개의 유효 벡터와 2개의 영 벡터로 나눌 수 있다. Table 1의 v_0, v_7 벡터처럼, 영 벡터는 서로 다른 스위칭 동작을 하더라도 같은 전압 벡터를 만들기 때문에 하나만 사용하더라도 컨버터 동작에는 영향을 주지 않는다. 이를 중복 전압 벡터라고 한다. 총 7개의 전압 벡터를 식 (10)-(11)을 이용해서 총 7개의 미래 전류를 계산할 수 있다. 그리고 7개의 예측 전류를 식 (14)를 이용해서 기준 전류와 가장 가깝게 만드는 전압 벡터를 선택한 후 그 전압 벡터를 만드는 스위칭 동작을 사용하면 된다. 제안하는 방법은 기존의 PI-PWM 방법처럼 캐리어와 비교해서 많은 스위칭 동작을 하지 않기 때문에 빠른 전류 응답을 얻을 수 있다.

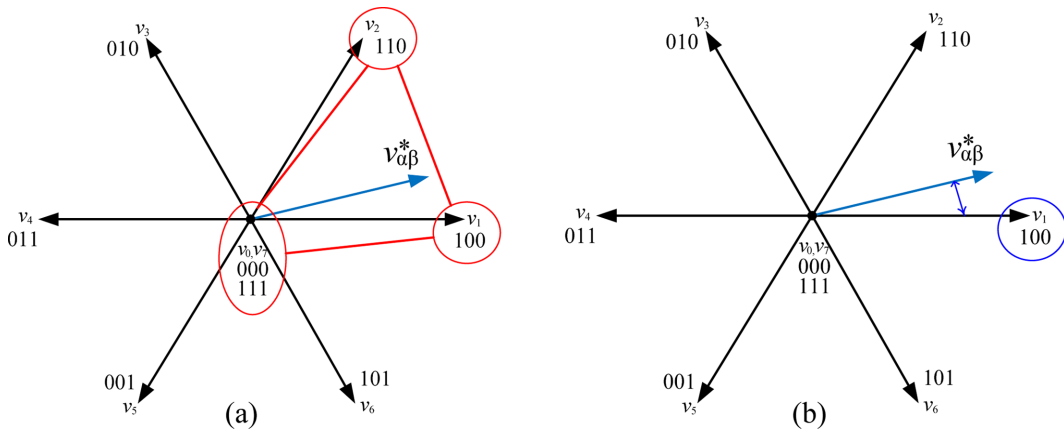


Fig. 6. The each voltage vector selection method in both (a)the conventional PI-PWM method and (b)the proposed model predictive control method (MPCC) according to the reference voltage vector in the voltage vector diagram.

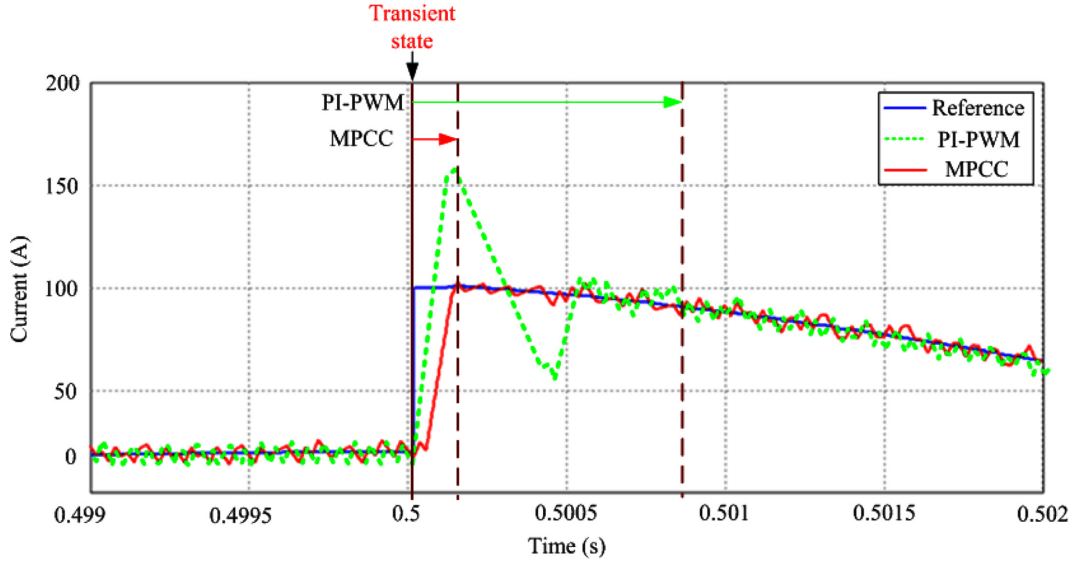


Fig. 7. Comparison of current dynamics of the conventional PI-PWM method and the proposed model predictive current control.

3.3 PI 기반 PWM 방법과 모델예측제어기법 비교

Fig. 6에 나타난 것처럼 기준 전압이 있을 때 기존의 PI-PWM 방법과 모델예측제어기법(MPCC)이 선택하는 전압 벡터가 다른 것을 확인할 수 있다. Fig. 6(a)에 나타난 것처럼 기존의 PI-PWM 방법은 기준 전압 벡터($v_{\alpha\beta}^*$)에 인접한 총 3개의 전압 벡터를 선택한다. 유효 벡터 2개와 영벡터를 이용하여 기준 전압 벡터를 추종한다. PI-PWM 제어 방법은 2장에 자세하게 설명되어 있다. Fig. 6(b)에 나타난 것처럼 제안하는 모델예측제어기법(MPCC)은 기준 전압에 제일 인접한 하나의 전압 벡터만 선택한다. 그리고 한 샘플링 동안 하나의 전압 벡터를 이용해서 기준 전압을 추종한다.

Fig. 7은 기존 PI-PWM 방법과 제안하는 모델예측제어방법(MPCC)에 따른 전류의 동특성을 나타낸다. 기존의 PI-PWM 방법은 과도 상태가 발생했을 때도 여전히 여러 개의 스위칭 상태를 사용하기 때문에 동특성이 늦어지는 것을 확인할 수 있다. 하지만 모델예측제어기법은 과도상태가 발생하면 하나의 전압 벡터만 사용하기 때문에 보다 빠른 동특성을 얻을 수 있다.

4. 시뮬레이션 결과

4.1 정상상태 분석

본 논문에서는 제안하는 모델예측제어기법(MPCC)의 성능 비교 검증하기 위해서 기존의 PI-PWM 방법도 같이 시뮬레이션을 진행하였다. 입력 에너지 변화에 따른 전력변환장치의 동특성을 보기 위해서 발전기 측 컨버터만 시뮬레이션을 진행했다. 시뮬레이션은 동일한 입출력 조건에서 진행하였다. 하지만 기존의 PI-PWM 방법은 제안하는 모델예측제어기법보다 한 샘플링 동안 많은 전압 벡터를 많이 사용해서 스위칭 개수가 더 많이 증가하기 때문에 제안하는 모델예측제어기법과 스위칭 개수를 비슷하게 맞추기 위해서 평균 스위칭 주파수를 동일하게 설정하였다. 제안하는 모델예측제어

Table 3. Power converter for wave energy converter simulation condition

Parameter	Values	Unit
Rated phase voltage (generator side)	575	V
DC-Link voltage	1300	V
Input Filter (Rf)	0.5	Ω
Input Filter (Lf)	1	mH
Average Switching Frequency	10	kHz

이기법과 기존의 PI-PWM 방법은 정상상태는 물론 다양한 과도상태들에 대해서 비교를 진행하였다. 다음 Table 3는 시뮬레이션 조건을 나타낸다.

Fig. 8은 기존의 PI-PWM 방법과 제안하는 모델예측제어기법의 정상상태 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 두 방법의 정상상태를 비교하기 위해서 동일한 평균 스위칭 주파수에서 시뮬레이션을 진행하였다. 전류 품질의 상태는 약간 다를 수 있지만 거의 유사한 전고조파왜율(Total Harmonic Distortion, THD)를 보여주고 있다. 전류 성능을 위한 전고조파왜율은 다음과 같이 계산한다.

$$THD_i = \sqrt{\frac{\sum_{n>1}^k I_{h,RMS}^2(n)}{I_{1,RMS}^2}} \quad (15)$$

$I_{1,RMS}$ 는 기본파 전류의 RMS 값을 나타내고, $I_{h,RMS}$ 는 고조파 성분의 RMS 값을 나타낸다. 고조파 성분(k)은 시뮬레이션 특성상 8333 번째까지 계산한다(PSIM에서 제공하는 고조파 측정 숫자). 뿐만 아니라, 기존의 PI-PWM 방법과 제안하는 모델예측제어기법 모두 발전기 D축 전류가 정확히 기준 전류 값을 추종할 뿐 아니라 거의 유사한 전류 리플을 보여주고 있다. 이는 두 방법이 평균 스위칭 주파수가 동일하기 때문이다. 또한 전류의 영향을 주는 입력 선간 전압 역시 두 방법이 유사하다. 하지만 기존의 PI-PWM은 캐리어와 비교를 통한 일정한 스위칭 형태를 가지고 있기 때문에 FFT 분석

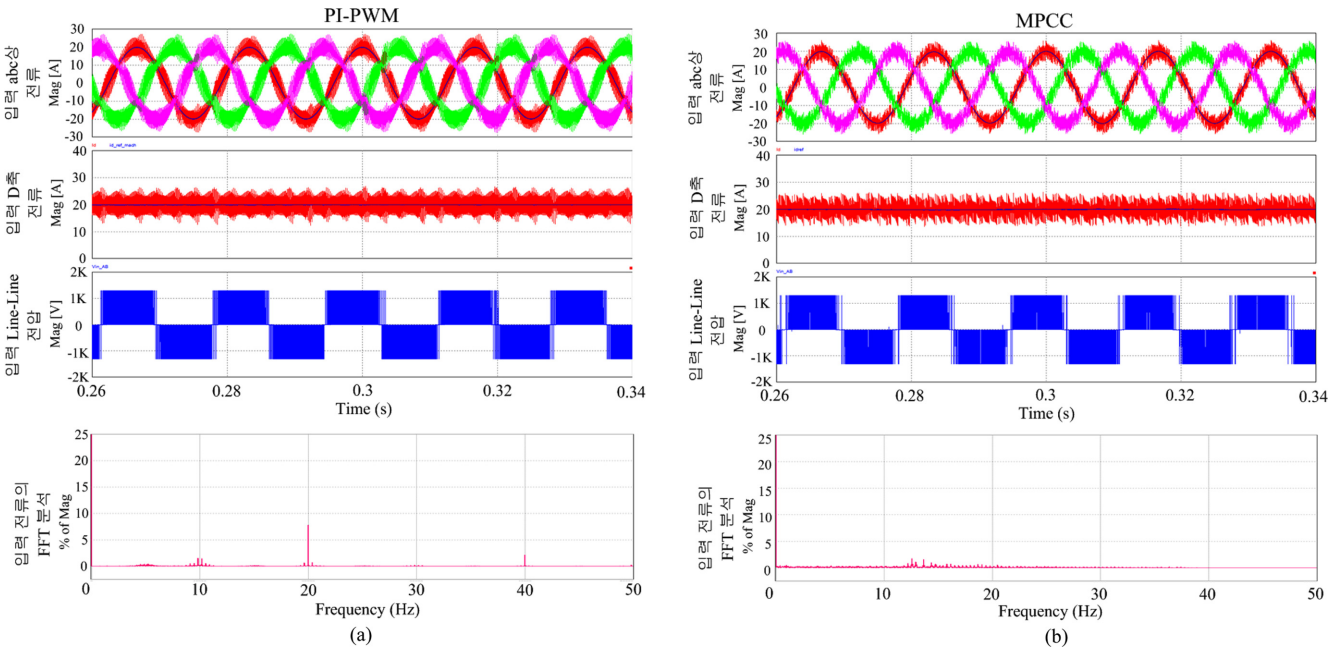


Fig. 8. Simulation results of generator side 3-phase input current (i_{abc_gen}), D axis current (i_{D_gen}), input line-line voltage (v_{ab_gen}) and the FFT analysis of input current (i_{abc_gen}) during the steady state: (a) conventional PI-PWM method and (b) proposed model predictive control method.

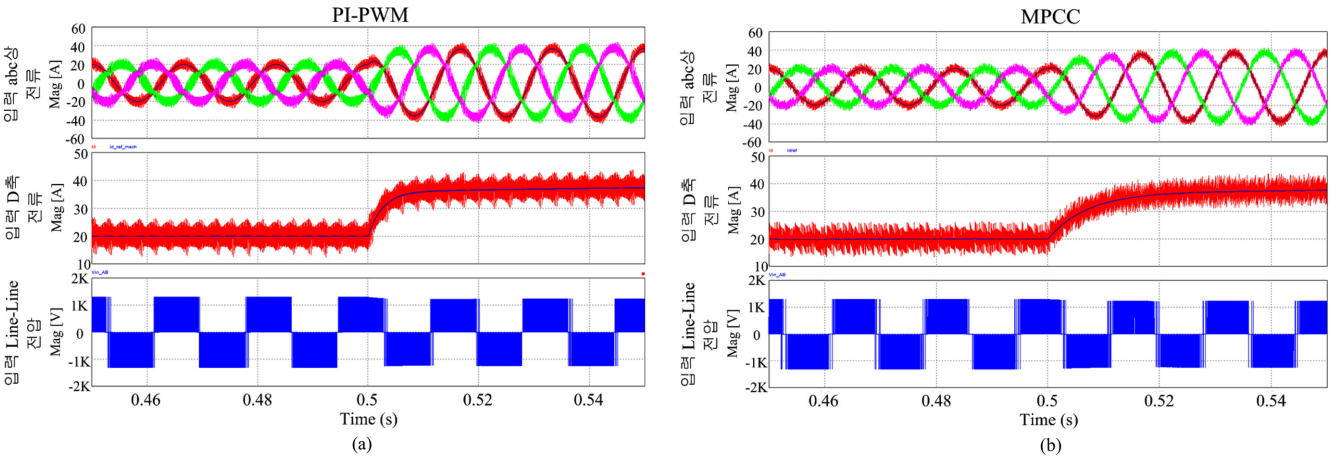


Fig. 9. Simulation results of generator side 3-phase input current (i_{abc_gen}), D axis current (i_{D_gen}), input line-line voltage (v_{ab_gen}) during the transient state according to load change: (a) conventional PI-PWM method and (b) proposed model predictive control method.

에서 일정한 주파수를 나타내지만, 최적화 제어 기반의 제안하는 방법은 주파수 영역이 약간 분산 되어있다. 두 방법은 다른 스위칭 형태를 가지고 있지만 동일한 평균 스위칭 주파수에서는 전력 품질의 성능은 유사한 것을 확인할 수 있다.

4.2 과도상태 분석

4.2.1 출력 부하 변동

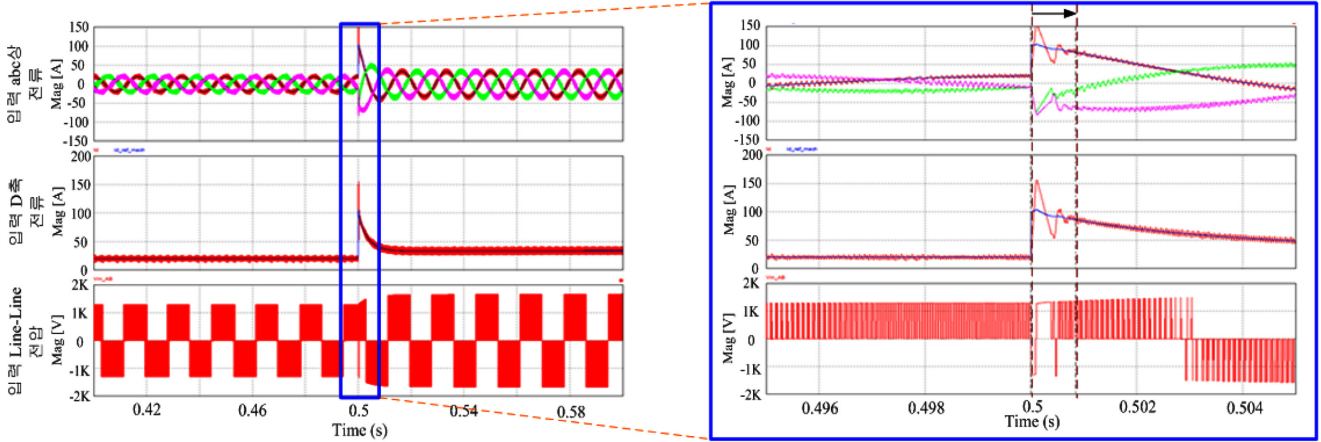
Fig. 9는 출력 부하 변동에 따른 기존 PI-PWM 방법과 제안하는 모델예측제어기법의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 출력 부하 변동은 출력 부하를 100 [Ω]에서 50 [Ω]으로 변동시켰다. 출력 부하 변동에 따라서 발전기 측 입력 전류(i_{abc_gen})는 급격하게 변하지 않았기 때

문에 발전기 측 입력 기준 전류(i_{abc}^*) 변동에 따른 각 방법의 동특성이 크게 차이 나지 않는 것을 확인할 수 있다. 두 방법의 발전기 측 3상 입력 전류의 동특성도 유사하게 나타났을 뿐 아니라 D축 전류의 움직임 역시 유사하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 입력 전압의 파형도 유사하게 나타나는 것으로 확인할 수 있다. 기존의 PI-PWM과 제안하는 모델예측제어기법(MPCC) 모두 입력 전류의 변동이 크지 않을 때는 동특성에 차이가 나타나지 않는 것을 확인할 수 있다.

4.3 출력 전압(V_{dc})의 증가

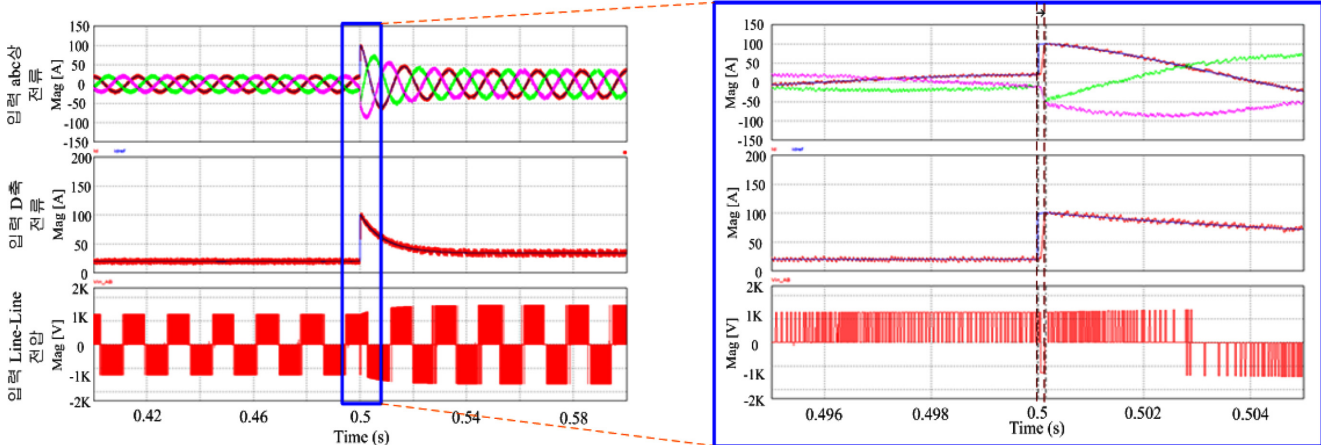
Fig. 10은 출력 전압(V_{dc}) 증가에 따른 기존의 PI-PWM 방법과

PI-PWM



(a)

MPCC



(b)

Fig. 10. Simulation results of generator side 3-phase input current (i_{abc_gen}), D axis current (i_{D_gen}), input line-line voltage (v_{ab_gen}) during the transient state according to increase of output voltage: (a) conventional PI-PWM method and (b) proposed model predictive control method.

제안하는 모델예측제어기법(MPCC)의 동특성 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 출력 전압(V_{dc})의 변동은 상위 제어기의 제어 변수로서 입력 기준 전류 값에 직접적으로 영향을 주기 때문에 출력 전압(V_{dc})의 증가는 입력 전류의 크기를 급격하게 증가시킨다. 즉, 이러한 결과를 통해서 실제 파랑에너지에 변동에 의한 각 방법의 동특성을 확인할 수 있다. 출력 전압(V_{dc})의 증가는 1100 [V]에서 1300 [V]로 변동시켰다. 출력 전압(V_{dc})이 증가했을 때, 변동된 출력전압(V_{dc})을 추종하기 위해서 Fig. 10에 나타난 것처럼 입력 기준 전류 값은 순간적으로 증가하게 된다. 기존의 PI-PWM 방법은 기준 전류 값이 변화하더라도 최적의 전압 벡터만 사용하는 것이 아니라 정상상태처럼 한 샘플링 동안 많은 전압 벡터를 사용하기 때문에 동특성이 저감된다. 하지만 제안하는 모델예측제어기법(MPCC)은 기준 전류 값이 순간적으로 변동했을 때 한 샘플링 동안 최적의 벡터만 사용해서 빠른 동특성을 얻을 수 있다. 이는

Fig. 10(b)에 나타난 것처럼 최단시간 안에 기준 전류를 추종할 수 있도록 한다. 다시 말해서 제안하는 모델예측제어기법(MPCC)은 입력 에너지가 급격하게 변화하는 파랑에너지 특성에 적합한 방법임을 나타낸다.

4.4 출력 전압(V_{dc})의 감소

Fig. 11은 출력 전압(V_{dc})의 감소에 따른 두 방법의 동특성 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 출력 전압(V_{dc})의 증가에 따른 시뮬레이션 결과와 유사한 결과가 나타난다. 출력 전압(V_{dc})이 1100 [V]에서 800 [V]로 변화했을 때 기준 전류 값은 순간적으로 감소하게 된다. 기존의 PI-PWM 방법은 기준 전압을 캐리어와 비교해서 스위칭 동작을 하기 때문에 과도 상태가 발생하더라도 한 샘플링 동안 여러가지 스위칭 상태를 변화한다. 이는 기준 전류 값을 실제 전류 값이 최단 시간으로 추종할 수 없게 만든다.

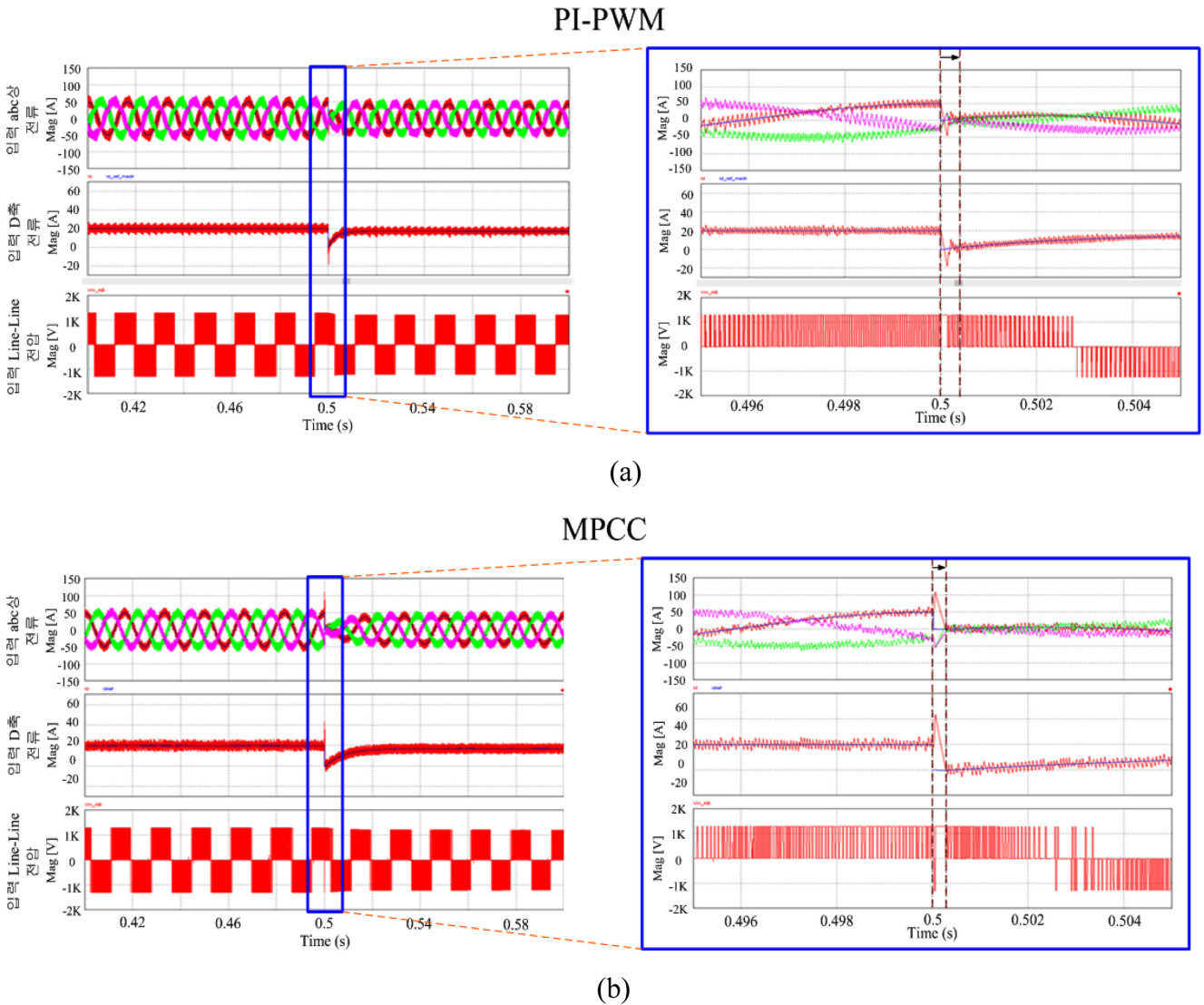


Fig. 11. Simulation results of generator side 3-phase input current (i_{abc_gen}), D axis current (i_{D_gen}), input line-line voltage (v_{ab_gen}) during the transient state according to decrease of output voltage: (a) conventional PI-PWM method and (b) proposed model predictive control method.

하지만 제안하는 모델예측제어기법(MPCC)은 한 샘플링 동안 최적의 전압 벡터만 사용해서 기준 전류를 추종할 때까지 하나의 전압 벡터만 사용하기 때문에 빠른 동특성을 얻을 수 있다. 이처럼 제안하는 모델예측제어기법(MPCC)은 출력 전압(V_{dc})이 증가할 때도 감소할 때도 빠른 동특성을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 즉 입력에너지가 증가하거나 감소하는 모든 경우에서 기존 PI-PWM방법보다 제안하는 모델예측제어 기법이 뛰어난 동특성을 나타낸다.

4.5 출력 전압(V_{dc})의 연속 변동

Fig. 12는 과량 에너지의 특성을 반영하기 위해서 지속적인 출력 전압(V_{dc})변화에 따른 기존의PI-PWM 방법과 제안하는 모델예측제어기법(MPCC)의 동특성 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 앞 장에서 분석한 단일적인 변화의 과도 상태가 아닌 실제 과량에너지의 특

성을 모사하기 위해서 지속적으로 출력 전압(V_{dc})을 변화시킨 과도 상태 분석을 진행하였다. 출력 전압(V_{dc})의 변화는 실제 과력발전 장치의 센서 데이터처럼 0.1초 단위로 변화시켰다. 출력 전압(V_{dc})은 과량에너지가 특성을 반영해서 출력 전압(V_{dc})을 일정시간 증가시켰다가 일정시간동안 감소시켰다. 기존의 PI-PWM 방법은 연속적인 동작에서도 앞 장의 분석처럼 과도 상태에서 한 샘플링 동안 여러가지 스위칭 상태를 사용하기 때문에 출력 전압(V_{dc})이 증가할 때도 감소할 때도 느린 동특성을 나타낸다. 하지만 제안하는 모델예측제어기법은 최적의 전압 벡터 하나만 사용해서 기준 전류를 추종하기 때문에 입력 에너지가 급격하게 변화해도 빠른 동특성을 획득하는 것을 확인할 수 있다. 즉, 제안하는 모델예측제어기법(MPCC)은 과량 에너지처럼 급격하게 변화하는 시스템에 더 적합한 알고리즘이라는 것을 확인할 수 있다.

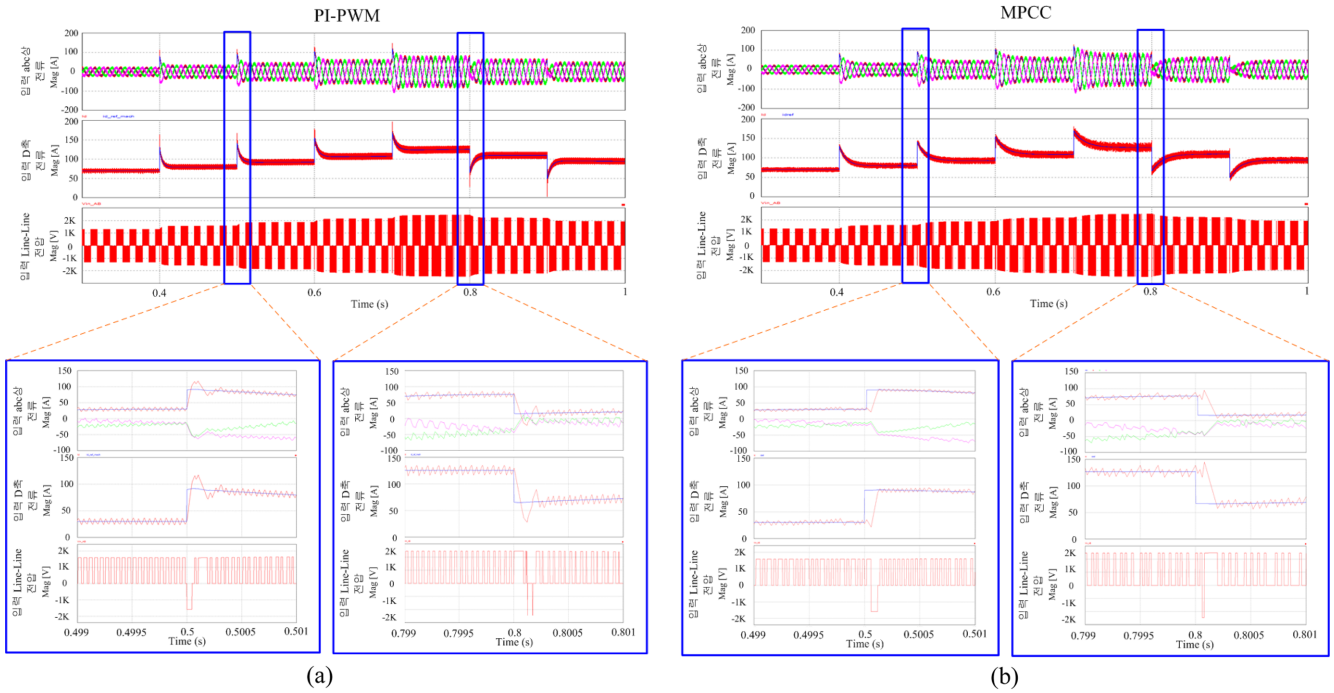


Fig. 12. Simulation results of generator side 3-phase input current (i_{abc_gen}), D axis current (i_{D_gen}), input line-line voltage (v_{ab_gen}) during the transient state according to continuous change of output voltage: (a) conventional PI-PWM method and (b) proposed model predictive control method.

5. 결 론

본 논문은 파력발전용 전력변환장치의 모델을 이용한 예측제어(MPCC)를 통해 빠른 동특성을 갖는 최적제어기법을 제안하였다. 제안된 방법은 전력변환장치의 모델을 통한 다음 스텝의 전류를 예측하고, 예측된 전류와 다음 스텝 기준 전류를 이용해 비용 함수(Cost Function)을 구성한 다음 매 샘플링 스텝마다 비용함수를 최소화하는 최적의 스위칭 상태 하나를 선택한다. 기존의 PI-PWM 방법처럼 매 샘플링 마다 다양한 스위칭 상태를 사용하는 것이 아닌 기준 전압 벡터와 가장 인접한 최적의 전압 벡터 즉 최적의 스위칭 상태 하나만 사용하기 때문에 빠른 과도 응답을 얻을 수 있다. 제안하는 방법의 제어기 성능을 검증하기 위해 PSIM을 통해 시뮬레이션을 진행하였고, 기존의 PI-PWM 방법과 제안하는 방법을 정상상태와 다양한 과도상태 비교 분석을 통해 제안하는 방법 빠른 동특성 성능을 입증하였다. 추후 영구자석동기발전기(PMSG) 및 전력변환장치의 축소 모델을 이용해서 제안된 방법의 성능을 검증할 예정이다. 뿐만 아니라, 가동 물체형 파력발전용 전력변환장치에 제안하는 알고리즘을 적용 후 성능비교를 진행할 것이다.

후 기

본 논문은 선박해양플랜트연구소의 주요사업인 “파력발전 통합 성능 및 구조안전성 해석기반 구축을 위한 WECAN 개발”에 의해 수행되었습니다(PES3530).

References

- [1] Babarit, A., Clement, A.H., 2006, Optimal latching control of a wave energy device in regular and irregular waves, Appl Ocean Res, 28(2), 77-91.
- [2] Drew, B., Plummer, A.R. and Sahinkaya, M.N., 2009, A review of wave energy converter technology, Proc. Inst. Mech. Eng. Part A: J. Power Energy, 223(8), 887-902.
- [3] Edenhofer, O., Ramón P. M., Youba S., Kristin S., Patrick M., Susanne K., Timm Z., Patrick E., Gerrit H., Steffen S., Christoph V.S., 2011, Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press.
- [4] Falcao, A.F.O., Candido, J.J., Justino, P.A.P., Henriques, J.C.C., 2012, Hydro dynamics of the IPS buoy wave energy converter including the effect of non-uniform acceleration tube cross section, Renew Energy, 41, 105-114.
- [5] Kazmierkowski, M.P., Jasinski, M., 2011, Power electronic grid-interface for renewable ocean wave energy, in Proc. 7th Int. Conf. -Workshop Compat. Power Electron., 457-463.
- [6] Luan, H., Onar, O.C., Khaligh, A., 2009, Dynamic modeling and optimum load control of a PM linear generator for ocean wave energy harvesting application, 24th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC, Washington, USA, 739-43.
- [7] Multon, B., 2012, Marine Renewable Energy Handbook. New York, NY, USA: Wiley.

- [8] Nicolas, M., Samir, K., Mariusz, M., Christian, A. R., Marek J., and Gabriel E., 2017, Medium-Voltage Power Converter Interface for Multigenerator Marine Energy Conversion Systems, *IEEE Trans, Ind Electron*, 64(2), 1061-1070.
- [9] Park, J.S., Hyon, B.J., Yun, J.B., Lee, J., Choi, J.Y., Choi, J.S., Hong, K.Y., 2016, Vector Control for Wave Power Generation System using Permanent Magnet Linear Synchronous Generator, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy*. 19(2), 120-128.
- [10] Rana, A., 2015 Renewables 2015 global status report, [Online]. Available:www.ren21.net
- [11] Roh, C., Kim, K.H., Kim, J.H., Hong, K.Y., 2019, A Comparison of PWM methods for Power Converter of OWC Wave Power Generation System, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy*. 22(2), 84-94.
- [12] Wang, L., Lee, D.J., Lee, W.J., Chen, Z., 2008, Analysis of an ovelautonomous marine hybrid power generation/energy storage system with a high-voltage direct current link, *J Power Sources*, 185(2), 1284-1292.
- [13] Zhou, Z., Sculler, F., Charpentier, J.F., Benbouzid, M., and Tang, T., 2014, An up-to-date review of large marine tidal current turbine technologies, in *Proc. Int. Appl. Electron. Conf. Expo.*, 480-484.

Received 3 July 2019

Revised 17 October 2019

Accepted 14 January 2020