PWM 컨버터 차량의 역률 제어를 통한 급전선로의 무효전력 보상

The Reactive Power Compensation for a Feeder by Control of the Power Factor of PWM Converter Trains

김용호 · 김 백*

Ronny Yongho Kim · Baik Kim

Abstract PWM converter trains exhibit excellent load characteristics in comparison with conventional phase-controlled trains with low power factors, as they can be operated at power factors which are close to unity by means of a voltage vector control method. However, in the case of a high track density or extended feeding, significant line losses and voltage drops can occur. Instead of operating these trains at a fixed unity power factor, this paper suggests a continuous optimal power factor control scheme for each train in an effort to minimize line losses and improve voltage drops according to varying load conditions. The proposed method utilizes the steepest descent algorithm targeting each car in the same feeding section to establish the optimized reactive power compensation levels that can minimize the reactive power loss of the feeder. The results from a simulation of a sample system show that voltage drops can be improved and line losses decreased.

Keywords : PWM converter, Reactive power, Line loss, Minimization, Voltage drop

초 록 PWM컨버터 차량은 전압벡터제어방식에 의해 부하역률 1.0에 가까운 운전이 가능하므로 기존 저역률의 위상제어방식 차량에 비해 급전선로 전압강하 측면에서 우수한 부하특성을 나타낸다. 그러나 이 경우에도 급전구간 내의 운전밀도가 높거나 연장급전 구간에서는 선로손실의 증가 및 전압강하 현상이 심각한 수준으로 나타날 수 있다. 본 논문은 PWM컨버터 차량의 역률을 1.0으로 고정하여 운행하는 대신 차량의 운전 조건에 따라 가변적으로 최적 제어함으로써 급전선로의 손실을 최소화 하고 전압 프로파일을 개선하는 방법을 기술하였다. 제시된 방법은 동일 급전구간 내에 운행중인 차량을 대상으로 최대 경사법에 의해 선로의 무효전력손실이 최소화되는 개별 차량의 무효전력 보상량을 결정하게 되며, 이 방법을 표본 계통에 대해 시뮬레이션 한 결과 선로손실의 감소와 함께 전압 프로파일도 상당한 수준으로 개선됨을 알 수 있었다.

주요어 : PWM컨버터, 무효전력, 선로손실, 최소화, 전압강하

1. 서 론

PWM(Pulse Width Modulation) 컨버터[1] 차량은 역률 0.75 부근으로 운행되던 기존의 위상제어방식 차량에 비해 고역률의 우수한 부하 특성을 가지고 있다. 이들 PWM 컨버터 차량은 역행 또는 회생 시에 보통 부하역률 1.0을 목표로 운전되고 있으며 이는 일반적인 부하의 기준으로 봤을 때 차량의 역행에 필요한 부하전류의 크기를 최소화 한다는 이점을 가지고 있다. 그러나 교류 급전계통에서는 유효전력 손실만이 아니라 무효전력 손실도 발생하므로 송전단인 전철변전소에서는 차량의 유효전력 부하, 선로의 유효전력 손실 외에 선로의 무효전력 손실을 공급 하게 되며 이에 의해 차량의 수전 전압이 감소하고 송전단 역률도 악화되게 된다. 따라서 차량의 역행에 필요한 부하전류로 발생한 선로의 무효전력 손실을 보상할 수 있다면 송전단에서의 공급

전류 크기를 감소시켜 전체적으로 선로손실을 감소시키고 급전선로의 전압 프로파일을 개선할 수 있다. 이러한 목적으로 상업용 전력계통에서 사용하는 정지형 무효전력 보상장치(SVC, Static Var Compensator)를 전철 급전계통에 적용하는 방안을 고려할 수 있으나 철도에서는 차량이라는 이동 부하와 정지형 보상장치라는 양자의 특성상 차량이 SVC로부터 원거리에 위치하게 되면 구간별로 과보상 또는 부족보상의 문제가 발생할 수 있으며 SVC의 설치는 경제적으로도 대규모 예산과 설치 장소의 확보라는 어려운 문제가 있다[2]. 본 논문에서는 동일 급전구간 내에서 운행하는 PWM 컨버터 차량들을 일괄적으로 1.0의 고정 역률로 운행하는 대신 차량의 운행 위치에 따른 선로 및 부하 조건에 따라 가변적으로 운전하여 선로의 무효전력 손실을 최적 보상하는 방법에 대해 연구하였다. PWM 컨버터 차량은 변조지수와 상차각의 조정을 통하여 연속적으로 지상 및 진상 영역에서의 운전이 가능함을 설명하고, 최대 경사법을 기본 알고리즘으로 하여 동일 급전구간 내에서 운행 중인 다수 차량의 위치 및 부하 상태를 연계하여 선로의 무효전력 손실을 최소화하는 최적 보상량을 산출하는 방법을 제시하였으

*Corresponding author.

Tel.: +82-70-8855-1661, E-mail : whitek@ut.ac.kr

©The Korean Society for Railway 2014

http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2014.17.3.171

며, 표본계통에 적용하여 만족할 만한 결과를 얻을 수 있었다.

2. 단상 PWM 컨버터 차량의 역률 조정

2.1 역률 조정 범위

단상 PWM 컨버터 차량의 개요도는 Fig. 1과 같다. 가공 전차선으로부터 25kV의 교류 급전전압을 공급받아 변압기와 컨버터를 거쳐 나온 직류전압은 직류 링크 캐패시터와 전압원 인버터 VSI(Voltage Source Inverter)를 통해 유도전동기나 동기전동기를 구동하게 된다.

이때, 차량의 소모전력 S_d 는,

$$S_d = P_d + jQ_d = v_s \cdot i_s^* = V_s \times \left(\frac{V_s - V_c \angle \delta}{Z_s \angle \theta} \right)^*, \theta = \tan^{-1} \frac{X_s}{R_s} \quad (1)$$

여기서, P_d 는 차량이 소모하는 유효전력 부하

Q_d 는 차량이 소모하는 무효전력 부하

로 표현되며, 한편 $v_s = \sqrt{2}V_s \sin \omega_0 t$ 로 주어졌을 때 V_{dc} 와 v_c 사이에는

$$V_c = mV_{dc} \sin(\omega_0 t + \delta) + \text{harmonics} \cong \frac{mV_{dc}}{\sqrt{2}} \angle \delta \quad (2)$$

의 관계가 있다[3,4].

여기서, v_s 는 차상변압기의 2차 측 출력전압, V

i_s 는 차량 부하전류, A

$Z_s = R_s + jX_s$ 는 변압기의 2차 측 환산 임피던스, Ω

v_c 는 단상컨버터 입력전압, V

V_{dc} 는 직류 링크(DC link) 전압, V

m 및 δ 는 각각 변조지수(modulation index) 및 전력상차각(power angle)

m 과 δ 에 의해 컨버터의 역률이 조정될 수 있음을 수식의 복잡함을 피하고 도해적으로 간단히 나타내기 위해 변압기의 리액턴스만을 고려하면($R_s = 0$) 식 (1)과 식 (2)로부터,

$$P_d = \frac{mV_s V_{dc}}{\sqrt{2}X_s} \sin \delta = P_m \quad (3)$$

$$Q_d = \frac{V_s^2}{X_s} - \frac{mV_s V_{dc}}{\sqrt{2}X_s} \cos \delta \quad (4)$$

(P_m 은 차량의 유효전력 부하)

Fig. 1 The PWM converter train scheme

Fig. 2 Power factor control range at a fixed power, P_d

여기서 교류 입력전압 V_s 는 차량의 위치가 정해지면 일정하다고 할 수 있고 또한 차량의 유효전력 부하가 일정하다면 직류 링크 쪽에서 인버터 측을 바라본 회로는 직류 저항으로 대체할 수 있어 전압 V_{dc} 는 역시 일정 값으로 고정되게 된다. 결국 유무효 전력을 제어할 수 있는 파라메타는 위 식에서 변조지수 m 과 전력상차각 δ 뿐이다. 이들 두 파라메타는 컨버터의 특성 및 사양에 의해 일정 범위 $m_{\min} \leq m \leq m_{\max}$, $\delta_{\min} \leq \delta \leq \delta_{\max}$ 내에서 조정된다고 가정하면, 전압 V_c 의 궤적은 Fig. 2의 음영 처리된 부분과 같이 표시된다. Fig. 2를 살펴보면 P_m 값의 변화에 따라 무효전력의 조정 범위가 바뀔 수 있다. 역률 1.0을 기준선으로 왼쪽 음영 부분은 지상 역률(무효전력 소모, $Q_d > 0$) 부분이고 오른쪽 음영 부분은 진상 역률(무효전력 발생, $Q_d < 0$) 부분이 된다. 가령 현재 차량의 유효전력 부하가 $P_m = P_a$ 라면, 무효전력의 조정 범위는 그림에서 보듯이 $Q_{a_{\min}} \leq Q_d \leq Q_{a_{\max}}$ 이며 $Q_{a_{\min}}$ 과 $Q_{a_{\max}}$ 은 식 (3)과 식 (4)로부터 각각,

$$Q_{a_{\min}} = \frac{V_s^2}{X_s} - P_s \cot \delta_{\min} \quad (5)$$

$$Q_{a_{\max}} = \frac{V_s^2}{X_s} - P_s \cot \delta_{\max} \quad (6)$$

과 같이 구할 수 있다.[5]

2.2 역률 조정에 따른 컨버터 동특성 검토

PWM 컨버터의 역률 제어를 검토하기 위해 SIMULINK와 Power system block sets를 사용하여 Fig. 3과 같은 모델을 작성하였다. 모델에는 PWM 신호 발생기와 함께 계산기, m 과 δ 의 조정 범위를 주어 주기 위한 리미터 그리고 계측

Fig. 3 The SIMULINK test model to assess the P.F. controllability of the PWM converter

(a) Converter response to the reactive power demand

(b) Converter response to the tractive effort

(c) v_s and i_s in the leading P.F. region
(The wave form with harmonics is i_s .)

(d) v_s and i_s in the lagging P.F. region
(The wave form with harmonics is i_s .)

Fig. 4 The results from the test model in Fig. 3

을 위한 스코프 들로 구성되어 있으며 이를 이용하여 역률 변경에 따른 동특성을 확인하고자 한다. Fig. 1의 인버터와 전동기 부분은 저항 R 로 대체하였으며 일반적인 전동차에서 출력이 1.0MW인 경우에 인버터의 입력전압이 1800V정도인 점을 감안하여 3.24Ω 로 설정하였고, 직류 링크 부분의 LC필터는 제2고조파에 동조되도록 파라메타 값을 정하였다[6]. 차량의 견인을 위한 유효전력 부하 P_m 은 2.0s까지는 1.0MW, 3.0s까지는 1.5MW 그리고 역률 조절을 위한 무효전력 수요 Q_d 는 1.0s까지는 0MVar, 2.0s까지는 -0.3MVar(진

상운전), 3.0s까지는 +0.3MVar(지상운전)으로 가정하여 계단 함수(Step function)형태로 인가된다고 보고 이때 요구하고 있는 역률 조절에 컨버터가 적절하게 응답하는지를 살펴보기로 한다.

Fig. 4는 위 실험 모델의 결과를 나타낸 그림으로서 그림 (a)와 그림(b)를 살펴보면 유효 및 무효 전력 요구(그림에서 실선으로 표시된 계단 입력)에 대해 시스템은 약 350ms~500ms 정도의 시간지연을 갖고 추종하고 있는 것을 볼 수 있다. 그러나 $t=2.0$ s에서와 같이 급격한 부하 변동이 있는 경

우에는 교란이 다소 증가하는 것을 알 수 있다. 계단입력에 대한 응답 시간은 현차 조건에서는 느리다고 생각되지는 않지만 과도한 오버슈트(Overshoot)를 유발하지 않는 범위에서 PID 제어기의 적분계수를 증가시키는 것을 고려할 수 있다고 생각된다. 그림(c) 및 그림(d)는 각각 진상 역률 운전 그리고 지상 역률 운전 시간대에서의 교류 입력전압(차량 수전전압) v_s 와 부하전류 i_s 의 위상 관계를 보여주는 그림으로서 진상 역률 운전 시간대에서 부하전류 i_s 는 입력전압 v_s 에 비해 $0.77\text{ms}(=16.7^\circ)$ 앞서고 있고 반대로 지상 역률 운전 시간대에서는 $0.52\text{ms}(=11.3^\circ)$ 뒤지고 있음을 나타내어 각 시간대의 역률 조건과 정확히 일치하고 있다. 실험 모델을 대상으로 한 이상의 결과로부터 현재 역률 1.0으로 운전 중인 PWM 컨버터 차량은 제어 방식의 변경으로 진상 및 지상 역률 대에서의 운전이 가능함을 알 수 있으며 이들 차량을 ‘정지형 무효전력 보상장치’에 대응되는 일종의 ‘이동형 무효전력 보상장치’로 사용할 수 있음을 확인할 수 있다.

3. PWM 차량을 이용한 급전구간 손실 최적화 전략

한 급전구간 내에서 1개 차량이 단독 운전 중이라면 차량의 무효전력 보상량은 선로의 무효전력 손실량과 동일하게 결정하면 된다. 그러나 다수의 차량이 동일 급전구간 내에서 운전 중이라면 급전구간 전체를 고려한 전역 최적화해를 구해야 한다. 급전구간 내의 서로 다른 위치에서 각각의 건인 조건에 맞는 유효전력을 소모하고 있는 차량들의 개별 무효전력 보상량은 급전구간 전체에서의 무효전력 손실을 최소화하는 양으로 결정되어야 하므로 다음과 같은 전역 최적화 문제로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} & \text{minimize } Q_{\text{loss}}(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) \\ & \text{s.t. } Q_i^{\min}(P_i) \leq Q_i \leq Q_i^{\max}(P_i) \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, $Q_{\text{loss}}(Q_1, Q_2, \dots, Q_n)$: n 개의 차량의 무효전력 보상량에 의한 급전선로의 무효전력 총 손실
 P_i : i 번째 차량의 유효전력 부하
 Q_i : i 번째 차량의 무효전력 보상량
 $Q_i^{\min}, Q_i^{\max}$: i 번째 차량의 무효전력 보상 가능 최소치 및 최대치

본 논문에서는 위와 같은 전역 최소화 문제를 최대 경사법(Steepest Descent Method)를 사용하여 진행하였다. 최대 경사법의 일반적인 알고리즘은 다음과 같다[7,8].

- 목적함수를 $f(x)$ 로 하자.
- 초기 추정값 x^0 를 선정한다.
- 경사도 $\nabla f(x^0)$ 를 계산한다.
- 다음 단계의 추정값을 일단 아래와 같이 설정한다. 여기서 α^0 는 변수로 본다.

$$x^1 = x^0 - \alpha^0 \nabla f(x^0)$$

- $f(x^1)$ 을 최소화하는 값(Step length) α^0 를 구한다. $f(x^1)$

Fig. 5 Modified algorithm for calculating the optimal reactive power compensation amount

은 α^0 에 관한 단일변수 함수이므로 일반적으로는 분석적 (Analytical)해를 쉽게 구할 수 있다. 즉, $\frac{\partial f(x^1)}{\partial \alpha^0} = 0$ 를 만족하는 α^0 를 분석적으로 구한다.

(f) 위에서 구한 α^0 를 사용하여 다음 단계의 추정값 x^1 을 $x^1 = x^0 - \alpha^0 \nabla f(x^0)$ 으로 확정한다.

(g) 위와 같은 과정을 $\|\nabla f(x^k)\| \approx 0$ 가 만족할 때까지 반복한다.

최대 경사법의 일반적 알고리즘은 단순 명료하나 우리가 다루고자 하는 최적 무효전력 보상량 결정에 적용시키기 위해서는 몇가지의 수정이 필요하다. 우선은 차량의 무효전력 조정범위에 의한 부등식 조건을 반영하여야 하며, 다음은 선로손실을 최소화하는 k 번째의 α^k 값을 구하는 문제가 있는데 선로의 무효전력 총 손실량은 급전계통에서 조류계산(Load flow)결과 후에 얻어낼 수 있으므로 α^k 에 대한 분석적 해를 구하기가 어렵다는 것이다. Fig. 5는 이와 같은 사항을 반영

하여 수정된 최대 경사법의 순서도를 표시하고 있다.

4. 구현 방안 및 시뮬레이션

한 급전구간 내를 운행 중인 개별 차량의 무효전력 보상은 급전계통 전체의 무효전력 손실을 최소화 시키는 전역 최적화(Global optimization) 문제에 대한 해로서 얻어지게 된다. 따라서 개별 차량은 각각의 현재 위치($D(n)$), 전인에 필요한 유효전력 부하($P(n)$)와 같은 운행정보를 실시간으로 LTE-R과 같은 철도 전용 무선통신망 등을 통하여 중앙 지령실에 전달하고 중앙 지령실에서는 전체 차량의 운행 정보로부터 전역 최적화 해를 구한 후 다시 개별 차량에 최적의 무효전력 보상량($Q(n)$)을 전달해야 한다. 무효전력 보상량을 수신한 차량은 Fig. 3의 PID 제어기에서 Pd_ref 값을 $P(n)$ 으로 유지한 채 Qd_ref 값을 $Q(n)$ 으로 선정하여 앞서 언급한 바와 같이 변조지수 m 과 전력상차각 δ 의 조정을 통해 차량의 역률을 조정하게 된다. Fig. 6은 이 과정을 개략적인 도해로 표시하고 있다[9].

본 논문에서는 1개 급전구간을 30km로, 여기에 6대의 차량이 운행 중인 것을 가정하여 2가지 경우의 유효부하를 설정하고 최대 경사법의 해를 이용하여 시뮬레이션 하였다. 각각의 경우는 또한 3대의 차량 및 6대의 전 차량이 무효전력 보상이 가능한 경우로 분리하였으며 각 차량의 무효전력 보상 범위는 $-0.2(\text{leading}) \sim 0.2(\text{lagging})$ 으로 설정하였다.

시뮬레이션은 Case 1과 Case 2의 두 경우에 대해 실행하

Fig. 6 A schematic design of the optimal reactive power compensation method

였다. 두 경우 모두 송전단 SS의 전압은 1.0PU로 동일하게 하여 각각의 경우에 차량 수전전압의 상대적인 비교가 가능하게 하였으며 급전선로의 임피던스는 표준적인 AT급전선로의 단락 임피던스 평균값을 사용하였다. Case 2는 Case 1에 비해 경부하의 경우로서(선로손실 측면에서는 선로 말단으로 갈수록 부하가 선로손실에 미치는 영향이 커짐), 결과를 살펴보면 상대적으로 중부하인 Case 1의 경우가 그에 비해 경부하인 Case 2의 경우보다 선로의 무효전력 손실 보상량이 크게 나타나며 상식적인 판단과 일치하는 결과라고 할 수 있다. 한편, 차량 3대만이 무효전력 보상을 실시하는 경우에 Case 1의 부하에서는 3대의 차량 모두 진상 보상용량 한계인 -0.2PU 까지 도달한 반면 상대적으로 경부하인 Case 2에서는 말단 차량 Car-6는 -0.1002PU 의 진상 보상량

Table 1 Simulation data and results for Case 1

Vehicle ID		SS	Car-1	Car-2	Car-3	Car-4	Car-5	Car-6	Feeder reactive loss[PU]
Location[km]		0.0	5.0	10.0	13.0	20.0	27.0	30.0	
Active load P[PU]		N/A	0.3	0.4	0.3	0.4	0.4	0.6	
No control	Q-opt[PU]	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.7110
	Voltage[PU]	1.0000	0.9420	0.8939	0.8712	0.8296	0.8021	0.7955	
3-car control	Q-opt[PU]	N/A	N/A	- 0.2000	N/A	-0.2000	N/A	-0.2000	0.6331
	Voltage[PU]	1.0000	0.9634	0.9377	0.9247	0.9055	0.8902	0.8883	
6-car control	Q-opt[PU]	N/A	-0.2000	-0.2000	-0.2000	0.0816	-0.2000	-0.2000	0.6310
	Voltage[PU]	1.0000	0.9734	0.9520	0.9415	0.9189	0.9131	0.9112	

Table 2 Simulation data and results for Case 2

Vehicle ID		SS	Car-1	Car-2	Car-3	Car-4	Car-5	Car-6	Feeder reactive loss[PU]
Location[km]		0.0	5.0	10.0	13.0	20.0	27.0	30.0	
Active load P[PU]		N/A	0.4	0.5	0.3	0.4	0.3	0.5	
No control	Q-opt[PU]	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.5740
	Voltage[PU]	1.0000	0.9470	0.9052	0.8868	0.8537	0.8330	0.8277	
3-car control	Q-opt[PU]	N/A	N/A	- 0.2000	N/A	-0.2000	N/A	-0.1002	0.5322
	Voltage[PU]	1.0000	0.9641	0.9401	0.9286	0.9115	0.8970	0.8941	
6-car control	Q-opt[PU]	N/A	-0.2000	-0.2000	-0.2000	-0.1264	0.1566	-0.2000	0.5267
	Voltage[PU]	1.0000	0.9726	0.9513	0.9414	0.9187	0.9017	0.9008	

(Feeder impedance : $0.12+j0.25\Omega/\text{km}$, base MVA: 15MVA, base Voltage: 25.0kV)

(a) Voltage profile for Case 1

(b) Voltage profile for Case 2

Fig. 7 Voltage versus distance profile for each case

이 요구되어 이 차량에는 무효전력의 보상용량에 여유가 생긴다. 이로 인해 선로에서의 무효전력 손실은 보상을 실시하지 않은 경우에 비해 각각의 사례에서 11.0% 및 7.3%로 감소 했음을 알 수 있으며 말단에서의 전압강하는 Fig. 7의 (a) 및 (b)에 보이는 바와 같이 보상 전에 비해 45.4% 및 38.5% 만큼 대폭 감소하게 됨을 알 수 있다. 6대의 차량 모두가 무효전력 보상을 실시하는 경우라면 계통의 상태는 더욱 안정적으로 운영되게 되며 각각의 사례에서 개선 전 보다 11.3% 및 8.2%의 무효전력 손실 감소 효과가 있으며 말단 전압강하도 56.6% 및 42.4% 만큼 감소하게 된다. 이 경우에는 Case 1의 Car-4 및 Case 2의 Car-4, Car-5에서 무효전력 보상량에 여유가 생기게 된다. 특이한 것은 두 가지 사례 모두에서 진상 역률이 아닌 지상 역률로 운전하는 차량들(Case 1의 Car-4 및 Case 2의 Car-5)이 발생하는 것을 볼 수 있으며, 이는 다수의 해집합을 갖는 비선형의 전력손실 방정식에서 알고리즘이 초기조건에 따라 최대 경사를 찾아가면서 식 (7)을 만족하는 하나의 최적해를 구한 결과이며 초기조건이 바뀌면 동일한 무효전력 손실을 갖는 다른 해가 도출될 수 있다고 판단된다. 그러나 최대 경사법에서는 초기조건에 따라 해의 수렴성에 큰 차이를 나타내고 있어 초기조건 설정에서는 어느 정도의 경험적인 데이터가 필요하다고 판단된다.

5. 결 론

본 논문은 PWM 컨버터 차량의 역률을 가변적으로 조정하여 급전선로에서 발생하는 무효전력 손실을 최소화하고 전압 프로파일을 개선하는 방법을 연구하였다. 급전구간 내를 운행하는 개별 PWM 컨버터 차량은 각각의 운행조건과 위치에 따라 최대 경사법에 의해 도출된 최적 무효전력 보상량을 할당 받으며 차량의 변조지수와 전력상차각의 조절을 통하여 열차를 제어하게 된다. 제시된 방법을 표본적으로 6대의 차량이 운행되는 계통을 대상으로 시뮬레이션 하였으며 급전선로의 무효전력 손실이 최소화되는 조건에서 급전선로의 전압 프로파일도 상당한 수준으로 개선됨을 확인할 수 있었다. 한편, 본 논문에서 제시된 방법을 현차 및 실 급전계통에서 구현할 시에 고려할 점과 개선할 점은 다음과 같다.

(1) 최적해를 구하는 방법으로 최대 경사법을 적용하였으나 초기치 설정에 따라 수렴시간에 큰 차이를 나타내고 있어 알고리즘의 가속화 방법(Acceleration method) 또는 Newton-Raphson 법과 같은 기타 알고리즘의 적용을 비교할 필요가 있다고 생각된다.

(2) 시뮬레이션에 사용된 PWM 컨버터는 정격전압 25kV 입력에서 제어기의 파라메타가 조정되어 있어 수전 전압의

변동(19~29kV)이 있는 경우, 응답속도 지연이나 오버슈트가 증가하는 경향을 보이고 있으므로 광범위한 입력 변동에 대응할 수 있는 PID 제어기의 강인성과 최적 파라메타 설계가 필요하다고 생각된다.

(3) 차량은 역률 제어에 필요한 무효전력 보상한도만큼 MTR 및 MCB의 용량 증가와 탑재 하중 증가를 고려하여야 할 것이다. 최대전인 유효전력 부하의 50% 수준의 무효전력 보상을 고려할 때 약 12% 수준의 용량 및 하중 증가분이 발생하므로 기존의 운행 중인 차량이나 신규 개발 차량에 적용 시에는 배치 공간 상의 제약과 이에 따른 변압기 손실 증가 등을 고려한 종합적인 검토가 필요할 것으로 생각된다.

후 기

이 논문은 2013년도 한국교통대학교 교내학술연구비의 지원을 받아 수행한 연구임.

References

- [1] Y.H. Lho (2011) A study on the design of voltage mode PWM DC/DC power converter, *Journal of the Korean Society for Railway*, 14(5), pp. 411-415.
- [2] J. Dixon, L. Moran, J. Rodriguez, et al. (2005) Reactive power compensation technologies : state-of-the-art review, *Proceedings of the IEEE*, 93(12), pp. 2144-2164.
- [3] J. Bauer (2008) Single phase pulse width modulated rectifier, *Acta Polytechnica*, 48(3), pp. 84-87.
- [4] A. Bellini, S. Bifaretti, S. Constantini (2002) High power factor converters for single phase AC traction drives, *International Conference on Computers in Railways VIII, COMPRAIL'02*, Lemnos, Greece, pp. 559-568.
- [5] B. Kim (2012) A study on the leading phase operation of single phase PWM converter train, *Journal of the Korean Society for Railway*, 15(4), pp. 357-363.
- [6] O. Stihl, B. Ooi (1988) A single phase controlled current PWM rectifier, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 3(4), pp. 453-459.
- [7] R. Burachik, L.M. Grana Drummond, A.N. Iusem et al. (1995) Full convergence of the steepest descent method with inexact line searches, *Optimization: A Journal of Mathematical Programming and Operations Research*, 32(2), pp. 137-146.
- [8] T. Kulwowanichpong, C.J. Goodman (2005) Optimal area control of AC railway system via PWM traction drives, *IEE Proc. of Electric power application*, 152(1), pp. 33-40.
- [9] R.Y. Kim, B. Kim (2012) The reactive power control of PWM converter trains for the minimization of feeding losses, *Autumn Conference & Annual Meeting of the Korean Society for Railway*, Gyeongju, Korea, pp. 151-156.

접수일(2014년 4월 15일), 수정일(2014년 5월 12일),
게재확정일(2014년 6월 10일)

Ronny Yongho Kim : ronnykim@ut.ac.kr

Department of Railroad Electrical and Electronics Engineering,
Korea National University of Transportation, 157 Cheoldobangmul-
wan-ro, Uiwang-si, Kyeonggi-do, 437-763, Korea

Baik Kim : whitek@ut.ac.kr

Department of Railroad Electrical and Electronics Engineering,
Korea National University of Transportation, 157 Cheoldobangmul-
wan-ro, Uiwang-si, Kyeonggi-do, 437-763, Korea