

교류전기철도 병렬급전 운영을 위한 위상조정장치 제어기법

이병복, 최규형*

서울과학기술대학교 철도전기·신호공학과

A Control Method of Phase Angle Regulator for Parallel-Feeding Operation of AC Traction Power Supply System

Byung Bok Lee, Kyu Hyoung Choi*

Department of Railway Electrical & Signaling Engineering, Seoul National University of Science & Technology

요약 교류전기철도 급전시스템에 병렬급전방식을 적용할 경우, 전동차 부하로 인한 전압강하 및 최대순시부하를 감소시켜 급전구간을 연장하고 급전용량을 향상시킬 수 있다는 장점이 있다. 그러나 변전소 간에 위상차가 있을 경우 순환전력이 발생하기 때문에 적용이 제한되며, 전동차 운행에 따른 부하 분포에 따라 변전소 부하 불균형이 커져서 급전용량이 저하되는 문제점이 있다. 본 논문에서는 변전소 위상차 및 전동차 부하분포에 따라 변동하는 순환전력을 실시간 제어하고 변전소 부하 불균형을 해소하기 위하여 사이리스터 제어 위상조정장치 (TCPAR: Thyristor Controlled Phase Angle Regulator, 이하 TCPAR)를 적용하는 방식을 제안하고, 이를 구현하기 위한 검토를 수행하였다. 전기철도 급전시스템에 TCPAR을 적용하기 위한 제어 기법으로서, 변전소 공급전력을 입력으로 이용하여 변전소 위상차 및 전동차 부하 분포에 따라 변동하는 순환전력과 변전소 부하 불균형을 효과적으로 억제하는 제어모델을 제시하였다. PSCAD/EMTDC를 이용한 시뮬레이션 결과, 전기철도 병렬급전에 제안한 TCPAR을 적용함으로써 변전소 위상차 및 전동차 부하분포에 따라 변동하는 순환전력 및 변전소 부하 불균형을 효과적으로 억제시킬 수 있다는 것을 확인하였다. 제안 기법을 전기철도 병렬급전에 적용할 경우, 병렬급전 적용 범위를 확대하고 급전용량을 증가시킬 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract The parallel-feeding operation of an AC traction power supply system has the advantages of extending the power supply section and increasing the power supply capacity by reducing the voltage drop and peak demand caused by a train operation load. On the other hand, the parallel-feeding operation is restricted because of the circulating power flow induced from the phase difference between substations. Moreover, the power supply capacity is limited because of the unbalanced substation load depending on the trainload distribution, which can be changed by the train operation along the railway track. This paper suggests a Thyristor-controlled Phase Angle Regulator (TCPAR) to reduce the circulating power flow and the unbalanced substation load, which depends on the phase difference and the trainload distribution and provides a feasibility study. A dedicated control model of TCPAR is also provided, which uses substation power supplies as the input to control the circulating power flow and an unbalanced substation load depending on the phase difference and the trainload distribution. Simulation studies using PSCAD/EMTDC shows that the proposed TCPAR control model can reduce the circulating power flow and the unbalanced substation load depending on the phase difference and the trainload distribution. The proposed TCPAR can extend the parallel-feeding operation of an AC traction power system and increase the power supply capacity

Keywords : Traction Power Supply, Parallel-Feeding, Circulating Power, Unbalanced Substation Load, TCPAR

이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비 지원으로 수행되었습니다.

*Corresponding Author : Kyu Hyoung Choi(Seoul National Univ. of Science & Technology)

email: cohen@naver.com

Received April 6, 2020

Revised April 29, 2020

Accepted May 8, 2020

Published May 31, 2020

1. 서론

전기철도에서 교류급전방식은 직류급전방식에 비해 전압이 높고 급전용량이 크기 때문에 도시철도를 제외한 일반철도와 고속철도에 널리 적용되고 있다. 그러나 교류급전방식에서는 변전소 사이에 위상차가 존재할 수 있기 때문에, 복수의 변전소로부터 병렬로 전력을 공급하기 곤란하다. 이에 따라 급전선로를 구간별로 구분하고 하나의 변전소에서 하나의 급전구간에 급전하는 단독급전방식을 채택하고 있다[1,2]. 이와 같은 단독급전방식에서는 전차선을 전기적으로 구분하기 위한 절연구간이 설치되기 때문에, 전기철도 운영 및 유지보수에서 다음과 같은 문제가 발생한다. 절연구간에서는 전력이 공급되지 않기 때문에, 전동차가 절연구간을 통과하는 동안에는 전동차 공급전력이 차단되어 관성력으로 통과하여야 한다. 더욱이 전동차 공급전력이 차단되지 않은 채로 절연구간을 통과할 경우에는, 대규모 아크가 발생하여 전차선이 소손되는 사고로 연결될 수 있다[3]. 한편, 절연구간에는 전차선을 전기적으로 구분하되 기계적으로는 연결하기 위한 절연구분장치가 설치된다. 이와 같은 절연구분장치는 전차선에 비해 중량이 크고 탄성이 작기 때문에, 전동차 집전장치에 진동과 충격을 초래함으로써 집전성능을 저하시키는 원인이 되고 있다[4].

이상으로부터, 절연구간을 두지 않고 변전소들로부터 병렬로 전력을 공급하는 병렬급전방식의 도입 필요성이 대두되고 있다. 이 방식에서는 절연구간을 두지 않기 때문에, 절연구간에서 발생하는 운영 및 유지보수상의 문제를 해결할 수 있다. 또한 단독급전방식에 비해, 급격하게 변동하는 전동차 부하변동에 대응하여 전력을 공급할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 병렬급전방식에서는 변전소들의 위상차로 인하여 순환전력이 발생한다는 문제가 있다[5,6]. 순환전력은 전차선 전류를 증가시키고 변전소 과부하를 초래할 수 있다. 이에 따라, 교류전기철도에서는 병렬급전방식을 광범위하게 적용하지 못하고 있으며, 변전소 간의 위상차가 최대 6° 이하인 경우 등 제한적으로 적용하고 있다[7].

교류전기철도에서 병렬급전방식을 확대 적용하기 위해서는 변전소 위상차로 인한 순환전력을 적절하게 제어할 필요가 있다[8,9]. 이를 위해 위상조정변압기를 적용하여 위상차를 감소시킴으로써 순환전력을 제어하는 방법이 연구되었다. 위상조정변압기는 선로전압과 90° 위상차의 전압원을 발생시키고, 이를 직렬변압기를 이용하여 선로에 인가함으로써 선로전압의 위상을 조정하고 순

환전력을 제어한다[10,11]. 그러나 위상조정변압기는 탭(tap) 제어방식으로 동작하여 변전소 위상차 수준에 따라 위상조정 전압원을 단계적으로 투입하는 제어방식으로 운영되기 때문에 실시간 연속제어가 불가능하다. 이에 따라, 병렬급전방식의 철도급전시스템에서 변전소 위상차 및 전동차 위치에 따라 실시간으로 변동하는 순환전력을 실시간으로 제어하기 곤란하다는 단점이 있다.

본 논문에서는 전기철도 병렬급전에서 변전소 위상차 및 전동차 위치에 따라 변동하는 순환전력 및 변전소 부하 불균형을 실시간으로 제어하기 위하여, 사이리스터 제어 위상조정장치(TCPAR: Thyristor-controlled Phase Angle Regulator, 이하 TCPAR)를 적용하는 방식을 제안한다[12]. 또한 TCPAR의 제어방식으로서, 변전소 위상차를 최소화하도록 제어하는 대신에, 변전소 공급전력을 입력으로 이용하여 변전소 부하 불균형을 최소화하도록 제어하는 방식을 제안한다. 제안 방식에서는 전기철도 병렬급전시스템에서 순간적으로 변동하는 순환전력을 실시간으로 억제함과 동시에, 변전소 부하 불균형을 해소시켜 변전소 설비 이용률을 향상시키고 급전용량을 증대시킬 수 있다. 제안한 TCPAR 제어기법을 국내 대표적인 교류전기철도 급전시스템에 적용하고, PSCAD/EMTDC를 이용한 시뮬레이션을 통하여 그 유용성을 확인한다[13].

2. 교류전기철도 병렬급전방식

교류전기철도 급전시스템에서는 전철변전소에서 154kV를 수전하여, 스코트(Scott) 변압기를 통하여 55kV의 단상전력으로 변환하여 AT (Automatic Transformer) 급전방식으로 전차선로에 공급한다. 전차선로는 급전선과 전차선, 레일로 구성되며, 선로를 따라 10km 마다 AT를 설치하여 전동차에 27.5kV의 교류전력을 공급한다. 변전소와 변전소 중간에 급전구분소를 두어 전차선로를 구분시키고, 변전소별로 구간을 나누어 단독급전방식으로 전동차 부하전력을 공급한다.

교류방식의 전기철도 급전시스템에서 병렬급전방식을 적용할 경우에는, 급전구분소에서 개폐기를 투입하여 전차선을 연결시킴으로써 양단의 변전소에서 전체 급전구간을 병렬로 공급하게 된다. 이때의 급전시스템의 간이 등가회로를 Fig.1에 보인다. 여기서, V_1 , V_2 는 변전소 전압이며, Z_T 는 전동차 부하이다. X_{SS1} , X_{SS2} 는 전원측 임피던스이며, X_{L1} 과 X_{L2} 는 변전소로부터 전동차 부하까지 전차선 구간의 선로임피던스로서, 각각 변전소로부터

의 거리 x_1, x_2 에 비례한다. i_1, i_2, i_3 는 회로망 전류로서, $i_2 - i_3 < 0$ 이면 순환전력이 발생하게 된다.

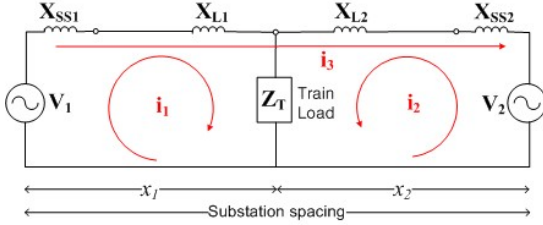


Fig. 1. Equivalent circuit of parallel-feeding power system

$$X_{L1} = x_1 \overline{X}_L \quad (1)$$

$$X_{L2} = x_2 \overline{X}_L \quad (2)$$

Where, \overline{X}_L denotes line impedance of trolley wire per length [Ω/km]

Fig.1에서 변전소 간의 위상차가 δ 이고, 급전구간 임피던스 $X_1 = X_{SS1} + X_{L1}$, $X_2 = X_{SS2} + X_{L2}$ 이며, 전동차 부하 $Z_T = R_T$ 이라면, 각 변전소로부터 공급되는 유효전력은 다음 식과 같이 계산된다.

$$P_1 = R_T V_1 V_2 \frac{X_1 X_2 \cos \delta + R_T (X_1 + X_2) \sin \delta + X_2^2 V_1 / V_2}{X} \\ = R_T V_1 V_2 \frac{X_2^2 V_1 / V_2 + \sqrt{X} \sin(\delta + \phi)}{X} \quad (3)$$

$$P_2 = R_T V_1 V_2 \frac{X_1 X_2 \cos \delta - R_T (X_1 + X_2) \sin \delta + X_1^2 V_2 / V_1}{X} \\ = R_T V_1 V_2 \frac{X_1^2 V_2 / V_1 - \sqrt{X} \sin(\delta - \phi)}{X} \quad (4)$$

Where, $X = X_1^2 X_2^2 + (X_1 + X_2)^2 R_T^2$,

$$\phi = \sin^{-1} \frac{R_T X_1 X_2}{\sqrt{X}}$$

변전소 공급전력 P_1, P_2 는 변전소 위상차 δ 와 더불어 급전구간 임피던스 X_1, X_2 에 의해서 변동하며, 음(-)이 되면 순환전력이 발생하게 된다. 이때 전동차는 이동 부하로서 작용하기 때문에, 전동차 위치에 따라 X_1, X_2 도 변하게 되어 변전소 부하 및 순환전력이 변동한다. 즉, 전동차가 위상이 앞선 변전소(SS_1)에 근접할 경우에는 ($X_1 \rightarrow 0$), $P_2 \leq 0$ 이 되어 순환전력이 증가하며, P_1 이 증가

하여 변전소 부하 불균형도 심화된다. 전동차가 위상 지연 변전소(SS_2)에 근접할 경우에는($X_2 \rightarrow 0$), P_2 가 증가하여 순환전력이 감소하며 변전소 부하 불균형도 완화된다.

3. TCPAR 적용

3.1 TCPAR 구성

병렬급전방식의 전기철도 급전시스템에서 변전소 위상차로 인하여 발생하는 순환전력을 제어하기 위하여 Fig.2에 보이는 TCPAR을 적용한다. TCPAR은 사이리스터 제어방식을 이용하여 선로전압과 90° 위상차를 갖는 전압원을 회로에 직렬로 공급함으로써 계통전압의 위상을 실시간으로 제어할 수 있다.

전기철도 급전시스템에서는 변전소의 스코트 변압기에서 3상 154kV를 90° 위상차를 갖는 55kV의 2상으로 변환하여 전차선로에 공급하므로, 90° 위상차의 전압원을 이용하여 TCPAR을 구성할 수 있다.

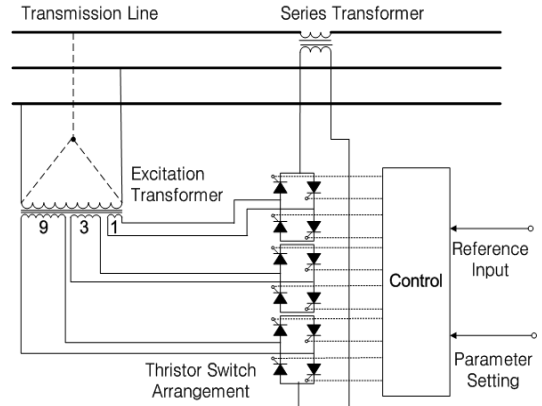


Fig. 2. Configuration of TCPAR

3.2 TCPAR 제어 기법

전기철도 병렬급전시스템에서 순환전력을 감소시키기 위한 TCPAR 제어기법으로서 다음 두 가지 방식을 검토한다.

3.2.1 위상차 제어방식

TCPAR을 이용하여 위상을 조정하면, 변전소 공급전력은 Eq.(5), (6)과 같이 된다. 여기서 변전소 위상을 검지하여 위상차가 최소화($\delta \rightarrow 0$)하도록 TCPAR을 제어하면, 위상 지연 변전소 전력 P_2 가 음(-)이 될 때 발생하는

순환전력을 감소시킬 수 있다. 그러나 병렬급전방식의 전기철도 급전시스템에서는 동일한 위상차에서도 전동차 부하 위치에 따라 순환전력 발생량이 크게 변동하므로, 단순히 위상차를 최소화하도록 TCPAR을 제어하는 방식은 효과적이지 못하다. 또한, 전동차 부하 위치에 따른 순환전력 변동 및 변전소 간의 공급전력 분배를 감안하여 위상차를 정밀하게 제어하는 방식은 구현하기 곤란하다는 문제가 있다.

$$P_1 = R_T V_1 V_2 \frac{X_2^2 V_1 / V_2 + \sqrt{X} \sin(\delta + \phi)}{X} \quad (5)$$

$$P_2 = R_T V_1 V_2 \frac{X_1^2 V_2 / V_1 - \sqrt{X} \sin(\delta - \phi)}{X} \quad (6)$$

Where, $\phi = \sin^{-1} \frac{R_T X_1 X_2}{\sqrt{X}}$

$$X = X_1^2 X_2^2 + (X_1 + X_2)^2 R_T^2$$

$$\delta' = \delta - \delta_{PS}$$

δ_{PS} denotes phase shifting of TCPAR

3.2.2 변전소 공급전력 제어방식

변전소 위상차와 전동차 부하 위치에 따른 순환전력 변동을 복합적으로 반영한 제어기법으로서, 양단의 변전소 공급전력을 검지하여 양단의 변전소 전력공급이 균등화되도록 TCPAR을 제어한다. 변전소 공급전력의 차이는 Eq.(3)과 Eq.(4)로부터 다음과 같이 계산된다.

$$P_1 - P_2 = R_T V_1 V_2 \frac{2R_T(X_1 + X_2) \sin\delta + X_2^2 V_1 / V_2 - X_1^2 V_2 / V_1}{X} \quad (7)$$

TCPAR을 이용하여 위상보정각 δ_{PS} 를 조정함으로써 $(P_1 - P_2) \rightarrow 0$ 이 되도록 제어하면,

$$R_T(X_1 + X_2) \sin\delta' \cong \frac{(X_1^2 V_2 / V_1 - X_2^2 V_1 / V_2)}{2} \quad (8)$$

Where, $\delta' = \delta - \delta_{PS}$,

δ_{PS} denotes phase shifting of TCPAR

가 성립하므로, 각 변전소 공급전력은 다음 식과 같이 양(+)이 되어 순환전력이 억제된다.

$$P_1 = P_2 \cong R_T V_1 V_2 \frac{X_1 X_2 \cos\delta' + (X_1^2 V_2 / V_1 + X_2^2 V_1 / V_2) / 2}{X} \geq 0 \quad (9)$$

이상으로부터, 변전소 공급전력을 입력으로 하여 PI제어에 의한 TCPAR의 제어모직을 Fig.3에 보인다.

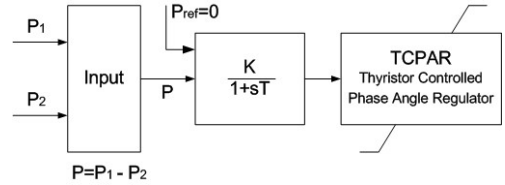


Fig. 3. TCPAR control logic

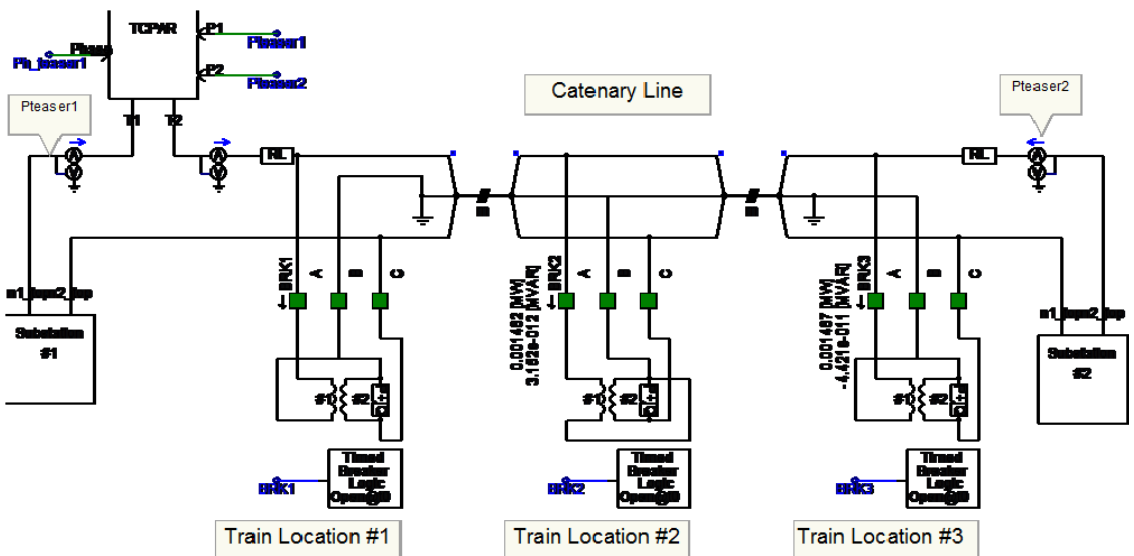


Fig. 4. PSCAD/EMTDC simulation model of traction power system with a TCPAR

이상과 같은 제어방식을 적용할 경우, 변전소 위상차를 포함하여 전동차 부하위치 변동에 따라 순환전력발생이 변동하는 것을 효과적으로 제어할 수 있다. 또한, 전동차 부하를 양쪽 변전소에 균등하게 분담시켜 부하 불균형을 감소시킴으로써 변전소 피크 부하를 감소시키고 설비 이용률을 향상시켜 병렬급전 효과를 극대화할 수 있다. 또한, 변전소 위상차는 정확하게 검지하기가 곤란한 반면에, 변전소 공급전력은 검지하기가 비교적 용이하여 제어를 상대적으로 구현하기 용이하다는 장점이 있다.

4. 시뮬레이션

제안한 전기철도 병렬급전에서의 TCPAR 제어기법을 검증하기 위하여 PSCAD/EMTDC를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 여기서 시뮬레이션 대상 전기철도시스템의 변전소 및 전차선로의 선로정수는 국내에서 운영 중인 전기철도시스템에서 측정된 선로파라미터를 Table 1과 같이 적용하였다[14].

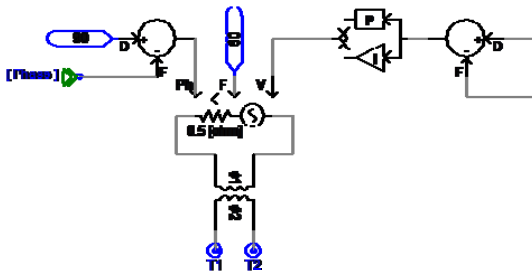


Fig. 5. PSCAD/EMTDC simulation model of TCPAR

Table 1. Specifications of traction power supply system

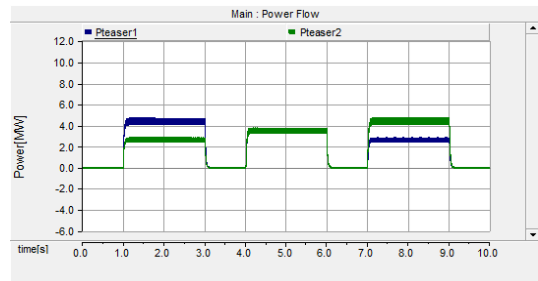
Parameters	Value
Power source impedance [Ω]	0.2882+j5.2784
AT impedance [Ω]	0.0320+j0.4488
Contact wire impedance [Ω/km]	0.1771+j0.7485
Rail impedance [Ω/km]	0.2470+j0.8520
Feeder impedance [Ω/km]	0.3597+j0.9576
Contact wire - rail mutual impedance [Ω/km]	0.0587+j0.3788
Rail - feeder mutual impedance [Ω/km]	0.0586+j0.3646
Contact wire - feeder mutual impedance [Ω/km]	0.0582+j0.4699

TCPAR을 적용한 전기철도 병렬급전시스템에 대한 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션 모델을 Fig.4에 보인다. 여기서, 스코트변압기로 구성된 변전소는 별도의 모듈로 구성하였으며, 전차선과 레일, 급전선으로 구성된 전차선로는 mutually coupled 3 wires 모델을 이용하여 Table 1의 선로파라미터를 적용하였다[15,16].

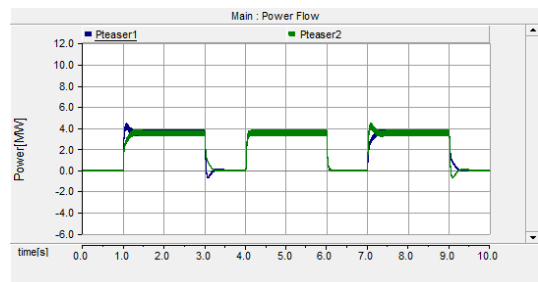
TCPAR은 Fig.5에 보이는 것처럼 별도의 모듈로 구성하였다. TCPAR은 계통전압과 90° 위상차의 전압원을 발생시키고 이를 직렬변압기를 통하여 선로에 공급하도록 하였으며, 전압원의 크기를 제어하여 위상조정각도를 조정하였다. 전압원의 제어는 Fig.3에 보이는 것처럼 양단의 변전소 공급전력(P_1, P_2)를 입력으로 하여, 그 차이를 최소화하도록 PI제어방식으로 제어하였다.

전동차는 12[MW]의 고정부하모델을 이용하여, 위상이 앞선 변전소#1 근처에서 위상이 늦은 변전소#2 근처로 전동차 위치를 이동시키면서, 순환전력 발생 및 TCPAR을 통한 순환전력 제어효과를 분석하였다. 변전소 위상차에 따른 시뮬레이션 결과는 다음과 같다..

(1) 변전소 위상차가 0° 인 경우의 시뮬레이션 결과를 Fig.6 (a)에 보인다. 순환전력은 발생하지 않고, 전동차의 위치에 따라 변전소 부하 불균형이 발생한다. TCPAR을 적용할 경우, Fig.6 (b)에 보이는 것처럼, 변전소 부하 불균형을 완전하게 해소시킬 수 있다.

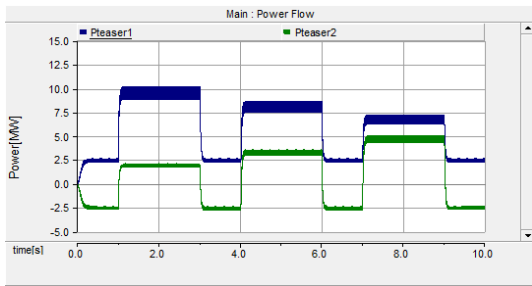


(a)

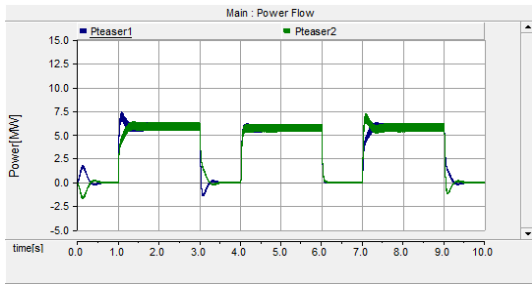


(b)

Fig. 6. Simulation results(phase difference=0°)
(a) Without TCPAR (b) With TCPAR

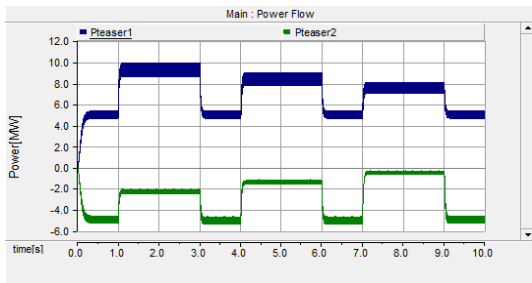


(a)

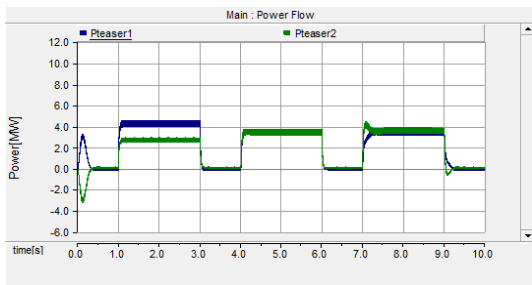


(b)

Fig. 7. Simulation results(phase difference=5°)
(a) Without TCPAR (b) With TCPAR



(a)



(b)

Fig. 8. Simulation results(phase difference=10°)
(a) Without TCPAR (b) With TCPAR

(2)변전소 위상차가 5° 인 경우의 시뮬레이션 결과를 Fig.7 (a)에 보인다. 전동차 부하가 없는 경우에는 순환 전력이 발생하나, 전동차 부하가 존재할 경우에는 순환전

력이 발생하지 않으며 변전소 부하 불균형이 발생한다. 부하 불균형은 특히 전동차가 위상이 앞선 변전소#1에 접근할수록 심해지며, 이때 대부분의 부하가 변전소#1에 집중하게 됨으로서 병렬급전의 효과가 저하된다. TCPAR을 적용함으로써 Fig.7 (b)에 보이는 것처럼, 전동차 부하위치와 관계없이 변전소 부하 불균형을 해소시킬 수 있다. 또한, 전동차 부하가 없는 순간에 발생하는 순환전력도 억제시킬 수 있다.

(3)변전소 위상차가 10°로 매우 큰 경우의 시뮬레이션 결과를 Fig.8 (a)에 보인다. 순환전력이 크게 발생하고 있으며, 변전소 부하 불균형도 크게 나타나고 있다. TCPAR을 적용함으로써 Fig.8 (b)에 보이는 것처럼 전동차 위치와 관계없이 순환전력을 억제하고 변전소 부하 불균형을 해소할 수 있다.

5. 결론

교류전기철도 급전시스템을 병렬급전방식으로 운영하기 위하여 TCPAR 적용을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

전기철도 병렬급전에서 발생하는 순환전력은 변전소 위상차와 함께 전동차 부하 위치에 따라서 크게 변동한다. 이때 변전소 부하 불균형도 발생하여 병렬급전 효과를 감소시킨다. TCPAR을 적용함으로써, 순환전력을 효과적으로 제어할 수 있으며, 변전소 부하 불균형도 해소시킬 수 있다.

TCPAR에 대한 제어방식으로서, 변전소 위상차를 최소화하도록 제어하는 방식은 전동차 부하 분포에 따른 순환전력 변동을 효과적으로 제어하기 곤란하다. 이에 따라 변전소 공급전력을 입력으로 하여 순환전력을 제어하는 방식을 제안하고, 시뮬레이션을 통하여 유용성을 확인하였다. 제안 방식에서는 변전소 위상차 및 전동차 부하 분포에 따른 순환전력의 제어와 더불어 변전소 부하 불균형을 최소화시킬 수 있다.

향후 고속철도 등 대용량 교류전기철도 급전시스템에 제안한 TCPAR을 적용하여 병렬급전방식을 도입하기 위한 추가 연구가 필요하다.

References

[1] I. K. Kang, "New electric railway engineering",

- Sungan-dang, 2014, pp.246-264.
- [2] R. J. Hill, "Electric railway traction - Part 3 Traction power supplies", *Power Engineering Journal*, Vol.8, No.6, pp.275-286, Dec. 1994.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1049/pe:19940604>
- [3] J. M. Canales, "Medium-voltage AC static switch solution to feed neutral section in a high-speed railway system", *Energies* 2018, 11, 2740, Available From: <https://www.mdpi.com/journal/energies>
DOI: <https://doi.org/10.3390/en11102740>
- [4] C. Y. Yoon, "A study on the interface between neutral insulating device of catenary and pantograph of electric vehicle", Master's Thesis, Usong University, Chung-Nam, Korea, pp.47-67, Dec. 2013.
- [5] C. M. Lee, H. M. Lee, S. C. Oh, "Study of phase difference between substations in parallel feeding method", *Proceedings of Annual Conference of the Korean Society for Railway*, May 2007.
- [6] J. S. Park, J. H. Song, "A study on the loop current induced by voltage phase difference substations during parallel feeding under the alternating current AT electric power feeding method", *Proceedings of Annual Conference of the Korean Society for Railway*, pp.1997-2004, Oct. 2011.
- [7] J. M. Lee, K. Oh, S. Chang, "The comparison and investigation of power supply capability according to feeding schemes in AC electric railway system", *Proceedings of Annual Conference of the Korean Institute of Electrical Engineers*, pp.1236-1238, July 2001.
- [8] J. Lim, K. Choi, W. Jang, "A study on reducing loop current for parallel power feeding railways", *Proceedings of Annual Conference of the Korean Society for Railway*, 2012.10.
- [9] K. H. Choi, "A phase-shifter for regulating circulating power flow in a parallel-feeding AC traction power system", *Journal of Electrical Engineering Technology*, Vol.9, No.4, pp.1137-1144, Sept. 2014.
DOI: <https://doi.org/10.5370/JEET.2014.9.4.1137>
- [10] J. Verboomen, D. Van Hertem, P. H. Schavemaker, W. L. Kling, "Phase shifting transformers: Principles and applications", *International Conference on Future Power Systems*, Amsterdam, Nov. 2005.
DOI: <https://doi.org/10.1109/FPS.2005.204302>
- [11] D. M. Dobrijevic, J. V. Milanovic, "Contribution of phase shifting transformer to improvement of the security of power transfer from the power plant", *7th Mediterranean Conference and Exhibition on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion*, Agia Napa, Cyprus, Nov. 2010.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1049/cp.2010.0953>
- [12] S. Nyati, M. Eitzmann, J. Kappenman, D. Van House, "Design issues for a single core transformer thyristor controlled phase-angle regulator", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol.10, No.4, pp.2013-2019, Oct. 1995.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/61.473349>
- [13] Manitoba HVDC Research Center, "PSCAD/EMTDC User's Guide", pp.41-84. Available From: <https://www.pscad.com/>
- [14] K. Oh, H. Lee, C. Lee, K. Lee, "Measurement method for catenary line constant", *Proceedings of Annual Conference of the Korean Society for Railway*, pp.620-627, Nov. 2000.
- [15] H. M. Lee, "Modelling AC electric railway system using PSCAD/EMTDC", *Proceedings of Annual Spring Conference of the Korean Institute of Electrical Engineers*, pp.260-262, Apr. 2002.
- [16] J. Y. Yoon, H. K. Choi, Y. Kim, S. B. Wee, "Model development of electrified railroad supply system for electromagnetic transient analysis", *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol.5, No.4, pp.253-259, Dec. 2002.

이 병 북(Byung Bok Lee)

[정회원]



- 2016년 2월 : 서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도전기-신호공학과 (공학석사)
- 1982년 12월 ~ 현재 : ㈜미동이엔씨 대표이사
- 2016년 3월 ~ 현재 : 서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도전기-신호공학과 박사과정

<관심분야>

전기설비, 전기철도

최 규 형(Kyu Hyoung Choi)

[정회원]



- 1992년 3월 : Hokkaido대학교 대학원 전기공학과 (공학박사)
- 1981년 6월 ~ 1996년 8월 : 한국전기연구원 선임연구원
- 1996년 8월 ~ 2005년 2월 : 한국철도기술연구원 수석연구원

- 2005년 3월 ~ 현재 : 서울과학기술대학교 철도전기신호공학과 교수

<관심분야>

전기철도, 철도정보통신