

능동위상제어기를 이용한 배전선로 자율 재구성 시 순환전류 감소 기법

김수연¹, 정다움¹, 박성준¹, 김동희[†]

Circulating Current Reduction Method during Distribution Network Dynamic Reconfiguration using Active Phase Controller

Soo-Yeon Kim¹, Da-Woom Jeong¹, Sung-Jun Park¹, and Dong-Hee Kim[†]

Abstract

In recent years, the demand for the distribution of energy resource has been increasing. However, the output power is limited by the stability of the distribution network. This study proposes an active distribution network that can reconfigure the distribution line using an active phase controller. The conventional distribution network has a fixed structure, whereas the proposed active distribution network has a variable structure. Therefore, the active distribution network can increase the output power of the distribution energy resource and reduce the overload of distribution line facilities. The active phase controller has two operation modes to minimize the circulating current during dynamic reconfiguration. In this study, the voltage and current control algorithms are proposed for the active phase controller. The proposed method for the active phase controller is simulated via PSIM simulation.

Key words: Active phase controller, Distribution network, FACTS, SSSC

1. 서 론

배전 계통(Distribution Network)은 송전 계통(Transmission Network)에 비해 간단한 구조를 가지고 있다. 하지만 환경문제가 대두되면서 신재생 에너지원인 태양광 및 풍력 등의 분산전원(Dispersed Generation)의 보급이 확대되면서 부하(Load)로만 구성되어 있던 배전 계통의 복잡성이 증가하였고, 송전 계통과 유사한 구조를 띠게 되었다^[1].

기존의 배전 계통은 변전소 주 변압기의 탭 조정 또는 선로의 전압 강하 보상(Line Drop Compensation, LDC) 등의 전압의 크기를 제어하는 것이 일반적이다.

하지만 송전 계통은 FACTS(Flexible AC Transmission System) 기기를 적용하여 송전 계통의 전압 및 선로 임피던스와 같은 계통의 변수들을 제어하여 시스템의 정

상상태 및 과도상태의 안정성을 개선한다^{[2]-[4]}. 예를 들어 SSSC(Static Synchronous Series Compensator)를 이용해 송전 계통의 전압과 위상을 개선하여 역률을 조절한다^{[5]-[7]}. SSSC는 선로 전류와 90°위상차를 가지는 전압을 주입함으로써 선로의 조류를 제어할 수 있다. 이는 송전선로의 저항값을 무시하고 선로 리액턴스만을 고려한 것으로 저항성분보다 리액턴스 성분이 지배적인 송전계통에서는 가능하지만, 배전계통의 경우 송전계통보다 거리가 짧고 전압이 낮아 저항성분을 무시할 수 없다. 이런 SSSC를 배전 계통에 적용하여 배전 계통의 안정성을 높이고자 저항성분을 고려하는 SSSC 제어 알고리즘에 대한 연구도 진행 중이다^{[8]-[10]}.

또한 송전계통에서도 저항성분을 고려하기 위해 X/R 비율을 최적화 알고리즘을 통해 찾아내는 연구도 진행되었다^[11].

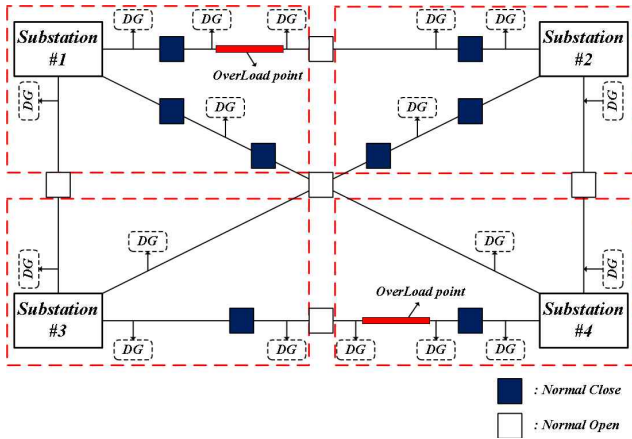
하지만 이러한 연구는 고정된 구조를 가지는 계통의 제어를 위한 것으로 한정되어 있다. 만약 배전계통의 구조를 한정시키는 것이 아닌 계통의 상황에 따라 구조를 자율적으로 재구성(Dynamic Reconfiguration)하여 현재 배전계통의 상황에 적합한 구조를 가질 수 있다면 과부하 지점(Over Load Point)에 용량 여유가 있는 타 변전소의 전력을 사용함으로써 과부하를 해소하여 설비 이용률을

Paper number: TKPE-2020-25-1-2

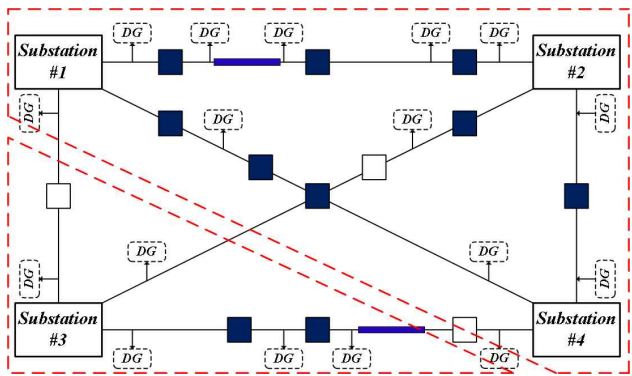
Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: kimdonghee@jnu.ac.kr, Dept. of Electrical Engineering, Chonnam Nat'l University
Tel: +82-62-530-1736 Fax: +82-62-530-1749

¹ Dept. of Electrical Engineering, Chonnam Nat'l University
Manuscript received Aug. 12, 2019; revised Aug. 27, 2019; accepted Oct. 17, 2019



(a) Radial



(b) Radial + Mesh

Fig. 1. Dynamic reconfiguration outline map of active distribution network.

높일 수 있다. 또한 배전계통의 상황에 적합한 구조를 가짐으로써 추가적인 발전 및 송전 설비의 설치 없이 증가하는 수요에 대응하는 것이 가능해진다.

그림 1은 방사형 구조를 가지는 4개의 변전소를 방사형 구조와 그물형의 복합적인 구조를 가지는 배전계통으로 재구성하여 과부하 지점을 해소한 것을 나타낸다.

하지만 배전 계통의 재구성을 위해 2개 이상의 변전소를 연결하게 되면 전압원(Voltage Source)을 병렬 연결한 구조가 된다. 위의 상황에서 배전선로의 전압 크기 및 위상이 일치하지 않을 경우 큰 순환전류가 발생되며, 두 변전소를 연결하는 순간에 순환전류가 발생하여 계통의 안정성에 악영향을 주게 된다. 앞서 설명한 문제점을 해결하여 배전계통의 자율 재구성을 하기 위해서는 배전계통의 전압 크기 및 위상을 조절할 수 있는 별도의 전력변환 장치가 필요하다.

본 논문에서는 자율 계통 재구성을 위한 위상 제어 장치로써 SSSC 구조를 이용한 능동위상제어기(Active Phase Controller, APC)를 구성한다. 또한 기존의 배전계통을 수동 배전망(Passive Distribution Network)라고 칭하고, 자율 계통 재구성이 가능한 배전망을 능동배전망(Active Distribution Network)이라 한다.

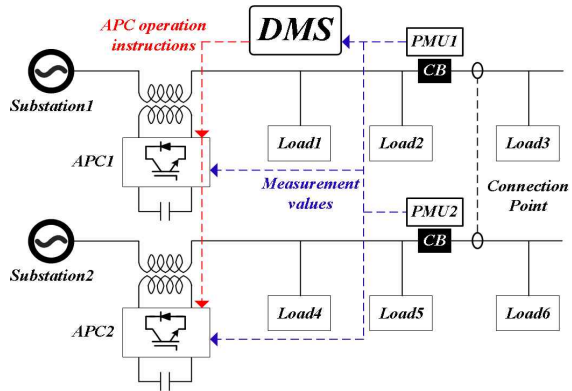


Fig. 2. Conceptual diagram of active distribution network.

그림 2는 능동배전망의 개념도를 나타낸다. 능동배전망의 자율 재구성을 위해서는 앞서 설명한 능동위상제어기뿐만 아니라 시스템 전체를 제어하는 배전관리시스템(Distribution Management System, DMS) 및 위상 측정 장치(Phasor Measurement Unit, PMU)가 필요하다. DMS는 능동 배전망 시스템 전체를 제어할 뿐만 아니라 설비 최적 이용 및 신재생 수용성 증대를 위해 계통의 구성을 상시적으로 재구성하는 알고리즘을 통해, PMU의 위상 정보를 받아서 각 APC에 운전 명령을 내린다. PMU는 자율 재구성을 위해 각 연계지점의 전압 및 위상정보를 측정하여 DMS와 APC에 측정치를 전달한다. APC는 능동배전망에서 자율 계통 재구성 시 연계하려는 두 계통의 위상 동기화를 위해 PMU로부터 연계지점의 전압 및 위상정보를 받아서 이를 제어하며, 분산형 에너지원에 의한 양방향 조류를 제어한다.

본 논문 능동위상제어기의 전압 제어기와, 전압 제어의 오차를 보상하기 위한 전류제어기를 추가하여 예기치 못한 순환 전류를 최소화하는 통합제어기를 제안한다. 마지막으로 제안한 능동위상제어기 및 통합제어기의 타당성을 시뮬레이션을 통하여 검증한다.

2. 능동위상제어기의 제어 알고리즘

본 논문의 초점은 배전계통의 연계 시, 순환전류를 억제하기 위해 연계지점간의 전압 크기 및 위상을 일치시키는 것이다. 능동위상제어기의 전압 제어는 PMU로부터 연계지점의 위상 정보를 받아서 전압 제어를 수행한다. 능동위상제어기는 연계지점에 설치되는 것이 아니라 변전소 앞단에 연결되기 때문에 연계지점의 전압을 직접적으로 제어할 수 없지만, 부하의 변동이 없다고 가정하였을 때 선로의 임피던스는 일정하므로 능동위상제어기가 설치된 지점의 전압을 제어함으로써 연계지점의 전압을 간접적으로 제어할 수 있다.

2.1 배전망 자율 재구성을 위한 APC의 출력전압

그림 3은 간략히 나타낸 배전선로의 등가회로이다. 두 개의

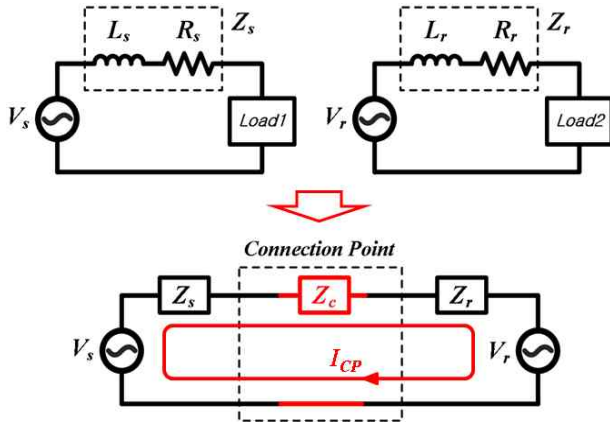


Fig. 3. Distribution line equivalent circuit for calculating the circulating current.

독립된 계통을 연결하여 두 변전소(전압원)가 연계된 것을 나타낸 것이다. 연계지점의 임피던스 성분을 Z_c 라고 정의하였으며, 두 변전소를 연계함으로써 발생하는 순환전류를 I_{CP} 로 표현하였다. 부하는 순환전류에 영향을 주지 않으므로 생략하였다.

그림 4은 능동배전망 위상제어의 원리를 나타낸 페이지도를 나타낸다. 연계지점의 전압을 각각 V_{cp1} , V_{cp2} 라고 하며 두 전압의 위상차를 δ 라고 정의한다.

기존 배전계통은 전압의 크기만을 제어한다. 분산전원의 증가로 인해 배전선로의 전압 제어는 복잡화되어, APC 운전 시 전압의 크기의 변화는 최소가 되도록 해야 한다^{[12],[13]}. 이를 위해 두 연계점의 전압페이저를 연결하는 직선상에서 APC 전압을 제어하여 위상을 조절하도록 하였다. 식 (1)은 각 APC 전압 크기의 합을 나타낸 것으로 그림 4의 페이지도를 분석하여 알 수 있다. 식 (2)는 연계지점을 기준으로 APC1의 전압 위상을 나타내며, 식 (3)은 APC2의 전압 위상을 나타낸다.

$$V_{APC1} + V_{APC2} = \sqrt{V_{CP1}^2 + V_{CP2}^2 - 2V_{CP1}V_{CP2}\cos\delta} \quad (1)$$

$$\alpha = 180^\circ - \sin^{-1}\left\{\frac{V_{CP2}}{(V_{APC1} + V_{APC2})} \sin\delta\right\} \quad (2)$$

$$\beta = 180^\circ - \sin^{-1}\left\{\frac{V_{CP1}}{(V_{APC1} + V_{APC2})} \sin\delta\right\} \quad (3)$$

두 개의 능동위상제어기를 사용할 경우, I_{APC1} 와 I_{APC2} 는 각 APC에 흐르는 전류로 선로에 흐르는 전류와 동일하다. APC의 용량을 고르게 사용하기 위해서는 식 (4)와 같이 각 APC의 전압 크기를 분배하며, 운전 범위 내에서 분배가 이루어져야 한다.

$$\frac{V_{APC1}}{V_{APC2}} = \frac{I_{APC2}}{I_{APC1}} \quad (4)$$

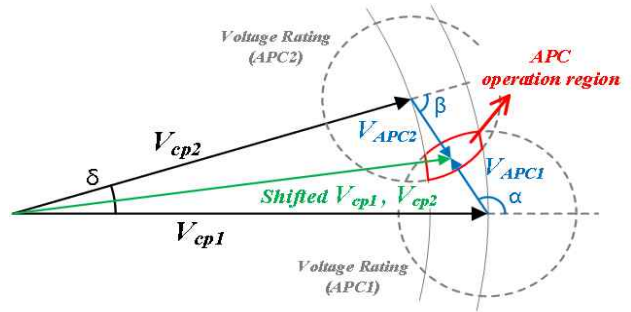


Fig. 4. A phaser diagram of active distribution network phase control.

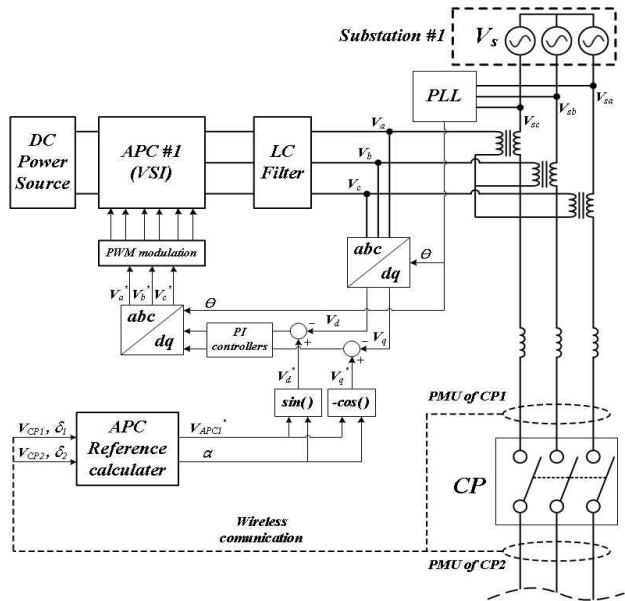


Fig. 5. Proposed voltage control algorithm for APC.

2.2 전압 제어 알고리즘

그림 5는 그림 4에서 나타낸 APC의 출력전압을 계산하여 전압지령으로 사용한 능동위상제어기 전압 제어의 알고리즘을 나타낸다. 능동위상제어기와 연계지점의 거리는 실제로 수 km 이상 떨어져 있기 때문에 연계지점의 전압을 직접 제어하는 것은 불가능하다. 변전소 1(Substation #1)의 전압을 V_s 라고 하고, 이 변전소에 APC가 설치되어있다면 APC는 V_s 의 위상을 기준으로 전압 제어를 하게 된다. PMU로부터 연결지점(CP1, CP2)의 위상 정보를 받아서 APC의 전압 크기(V_{APC}^*)와 위상(a)를 계산한다. V_{APC}^* 와 a 의 값을 전압 제어기의 d 축 및 q 축 전압 지령치로 사용한다. 제어기는 널리 사용되는 정지 좌표계 d-q축 비례적분 제어기를 사용한다.

$$I_{CP} = \frac{|V_s| \angle \delta_s - |V_r| \angle \delta_r}{Z_s + Z_r + Z_c} \quad (5)$$

2.3 PMU 오차 보상을 위한 통합 제어기

모든 제어 시스템은 측정 및 제어기 등에 의한 오차

TABLE I
DISTRIBUTION LINE IMPEDANCE

R	0.182 [Ω/km]	X	0.391 [Ω/km]
	Condition 1	Condition 2	Condition 3
Z_s	10 [km]	5 [km]	10 [km]
Z_r	10 [km]	5 [km]	10 [km]
Z_c	10 [km]	5 [km]	5 [km]

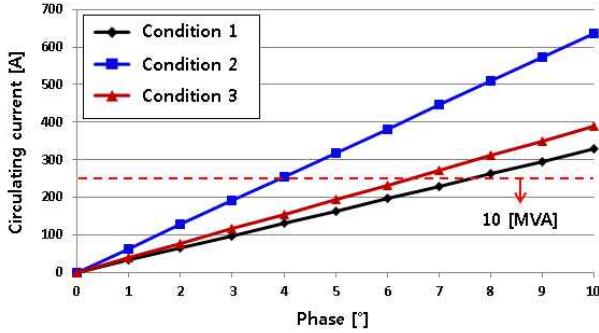


Fig. 6. Circulating current according to phase error.

가 필연적으로 발생된다. 하지만 앞서 설명한 전압 제어 알고리즘은 PMU의 전압 정보를 기준으로 수행하기 때문에 제어기의 성능은 PMU의 오차에 의해 결정된다.

식 (5)는 순환전류의 크기를 나타낸다. 두 개의 계통 전압 V_s , V_r 의 크기가 같다고 가정하면, 순환전류는 두 전압의 위상차와 선로 임피던스에 의해 결정된다. 선로의 임피던스는 앞서 설명한 바와 같이 저항성분을 무시할 수 없으며, 그 크기는 선로 길이에 따라 달라진다.

표 1은 길이에 따른 선로 임피던스의 크기를 나타내며 오차에 따른 순환전류를 확인하기 위해 설정한 3개의 선로 조건을 나타낸다. 선로 임피던스는 국내 가공선으로 많이 쓰이는 ALOC-160를 기준으로 한 파라미터이다.

그림 6은 표 1의 임피던스 정보를 식 (5)에 대입하여 x축을 위상차, y축을 순환전류로 나타낸 그래프이다. PMU 위상차의 오차 편고치는 IEEE1547 규격으로 10 [°]이므로 0 - 10 [°]까지 나타내었다. 위상차 오차가 증가할수록 순환전류가 선형적으로 증가함을 알 수 있으며, 연계지점을 어떤 위치에 배치하느냐에 따라 선로 임피던스가 바뀌어 순환전류의 크기가 배전 계통의 용량 (10 [MVA])을 초과할 수 있음을 알 수 있다.

앞서 설명한 바와 같이 PMU 정보를 받은 전압 제어만으로 계통 연계 재구성을 수행할 경우 계측 오차에 의해 계통이 불안정해진다. 따라서, 계측 오차에 의한 순환전류를 억제하기 위해 추가적인 제어기가 필요하다.

그림 7은 본 논문에서 제안하는 APC용 통합제어기를 나타낸다. PMU의 측정 오차, 통신에 의한 정보 지연 등

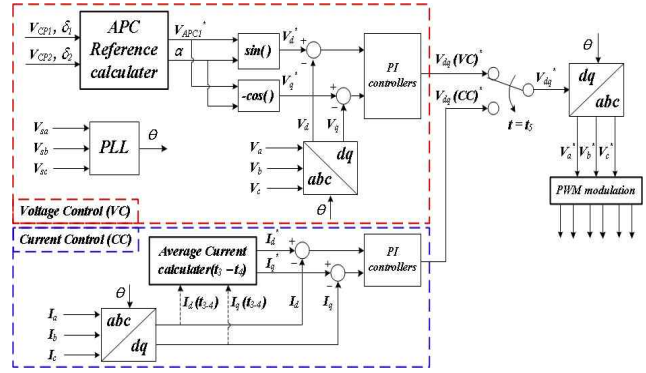


Fig. 7. proposed integration control algorithm for APC.

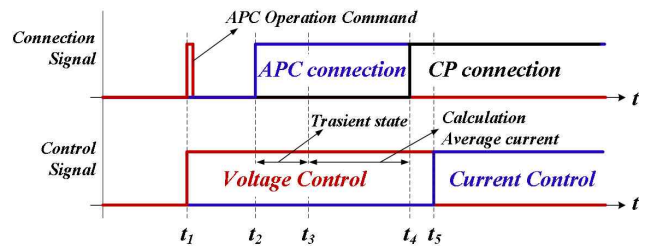


Fig. 8. APC operation time chart.

의 이유로 인한 오차를 보상하기 위해 전류 제어 알고리즘을 추가하였다. 연계지점을 연결하는 순간 배전선로를 전압원이 아닌 전류원처럼 동작하여 연계지점에 흐르는 순환전류를 제한하는 것이다. 이를 구현하기 위해 일정한 동작 시퀀스가 필요한데, 그림 8의 APC의 동작 타임차트를 통해 나타내었다.

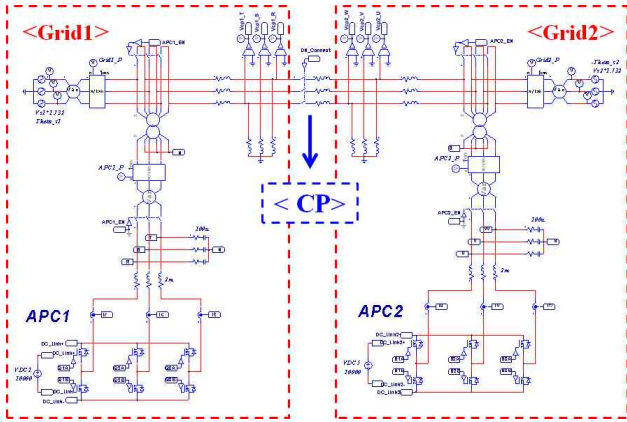
t_1 : DMS로부터 APC 작동 명령이 전달되면 APC는 전압지령을 계산하여 전압 제어를 시작한다.

t_2 : APC를 계통에 연결하게 된다. 연결 후 정상상태가 될 때까지 시간 지연($t_2 - t_3$)을 가진 후, 전류제어를 위한 평균 전류($I_{dq}(t_{2-3})$)의 계산을 시작한다. 계산된 평균 전류는 전류제어기의 지령치로 사용된다.

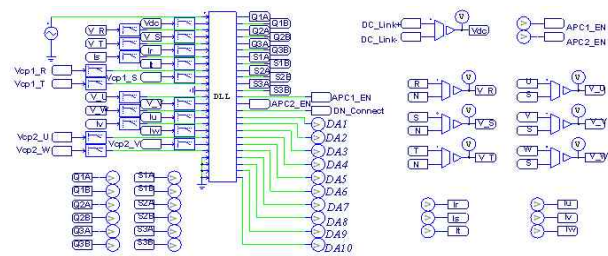
t_4 : 연계지점을 연결하고, t_5 시간에 전류제어로 제어를 전환하여 순환전류를 억제한다. 실제 계통에 적용될 경우 $t_4 = t_5$ 로 하여 연계와 동시에 전류제어도 전환하면 되지만, 본 논문에서는 전압 제어기만 사용하였을 경우와 통합제어기를 사용하였을 경우의 성능 비교를 위해 시간 간격을 두었다. 이후에는 조류제어를 수행하여 각 변전소의 전력사용량을 조정할 수 있다.

만일, 전압 제어를 하지 않고 선로간의 연계와 동시에 전류제어만을 수행하게 된다면 실제 전류가 전류 지령치를 따라가는 과도상태에서 큰 전류가 흘러 배전선로의 보호기기가 동작할 우려가 있다.

과도상태의 순환전류를 줄이기 위해서는 전류제어 동작을 하기 전에 전압 제어를 수행하여 선로의 위상차를 최소로 맞춘 후, 선로 연결과 동시에 전류제어를 한다면 과도 시간을 줄이고 순환전류의 최소화 가능하다.



(a) Equivalent circuit of distribution network



(b) DLL and Sensor

Fig. 9. Simulation circuit.

TABLE II
DISTRIBUTION LINE PARAMETER

V_s	22.9 [kV]	V_r	22.9 [kV]
δ_s	0°	δ_r	-10°
R_s	1.82 [Ω]	R_r	1.82 [Ω]
L_s	10.38 [mH]	L_r	10.38 [mH]
R_{cp}	1.82 [Ω]	L_{cp}	10.38 [mH]

3. 시뮬레이션 검증

본 장에서는 시뮬레이션을 통해 제안한 제어기의 유용성을 입증한다. 그림 9는 검증을 위한 시뮬레이션 회로도를 나타낸다. 그림 9(a)는 두 개의 전압원을 각각 Grid1(V_s)과 Grid2(V_r)의 무한모선으로 설정하고, 연계지점의 위상을 조절하기 위해 변압기를 통해 APC를 계통에 직렬로 연결하였다. 또한 각 Grid 사이에 기계적 스위치를 두어 연계지점(CP)을 구성하였다. 그림 9(b)는 APC를 제어하기 위한 DLL블록으로 입력으로 전압 및 전류 센서값을 받고, 출력으로 연계지점의 연결 신호와 PWM신호를 구성하였다.

시뮬레이션에서 사용된 배전선로의 파라미터는 표 2와 같으며, 선로 임피던스는 표 1의 조건 1과 동일하다. 연계 시의 순환전류 크기는 부하와 관계가 없어 부하의 크기는 고려하지 않는다. 그림 10은 APC를 사용하지 않고

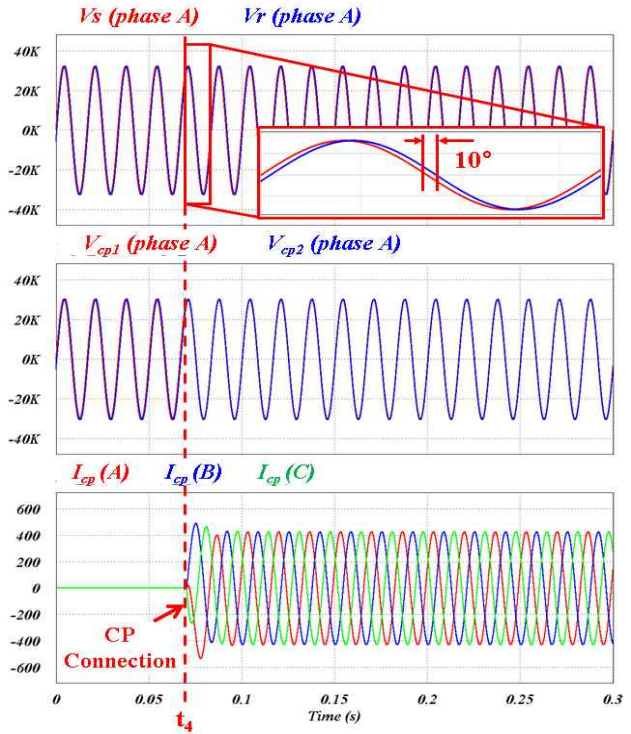
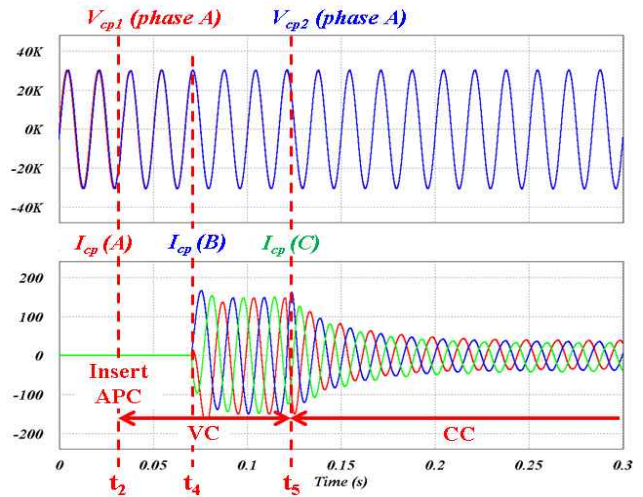
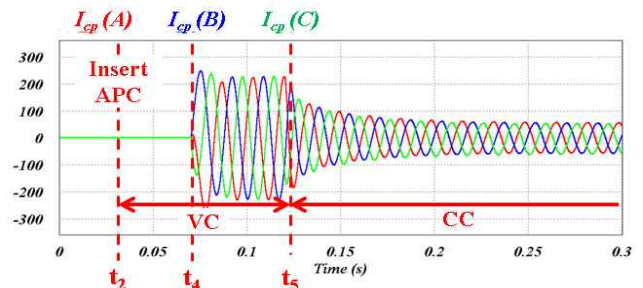


Fig. 10. Grid voltage and circulating current waveforms.



(a) Phase error : $3 [^\circ]$



(b) Phase error : $5 [^\circ]$

Fig. 11. Grid voltage and circulating current waveforms according to phase error.

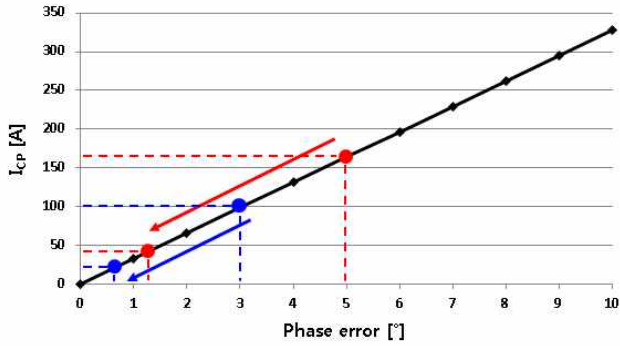


Fig. 12. Phase error compensation by using integration controller.

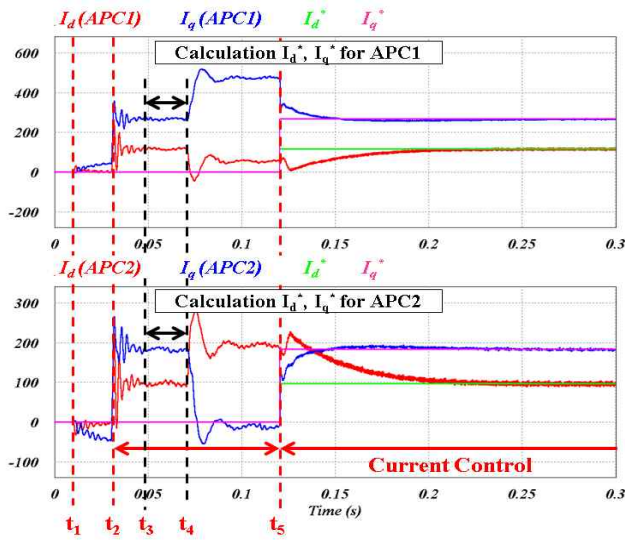


Fig. 13. DQ current of APC.

연계하였을 때의 출력 파형이다. 각 계통의 전압은 위상 비교를 위해 A상만을 표시하였다. 연계지점에 흐르는 순환전류는 I_{cp} 라고 정의한다. 각 변전소 전압 V_s 및 V_r 은 10 [°]의 위상차를 유지하고 연계지점의 전류 I_{cp} 는 약 306[A]의 순환전류가 흐른다.

그림 11은 APC를 사용하여 연계하였을 때 PMU의 계측 오차에 따른 출력 파형을 나타낸다.

그림 11(a)는 PMU가 실제 배전계통의 위상차보다 3 [°]의 계측 오차를 가져 7 [°]로 인식한 경우의 전압 및 전류 파형이다. PMU로부터 받은 정보를 가지고 전압 제어를 하였을 때 $t_4 - t_5$ 동안 순환전류는 약 108 [A]가 흐른다. t_5 에서 전류제어를 시작하여 정상상태에 도달한 후에는 순환전류가 약 26.5 [A]로 감소하였다. 그림 6을 기준으로 0.8 [°]의 계측 오차를 가질 때의 순환전류 크기와 동일하다.

그림 11(b)는 PMU가 실제 배전계통의 위상차보다 5 [°]의 계측 오차를 가져 5 [°]로 인식한 경우의 전압 및 전류 파형이다. 전압 제어를 하는 $t_4 - t_5$ 동안 순환전류는 약 163 [A]가 흐른다. t_5 에서 전류제어를 시작하여

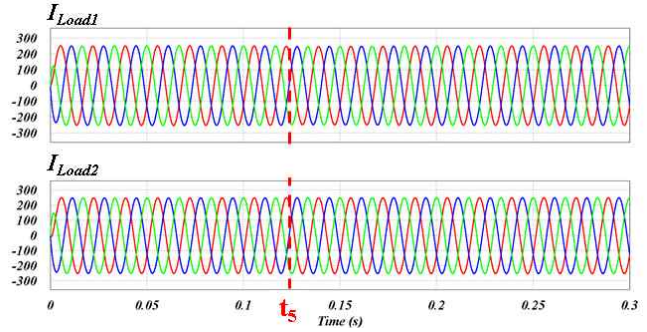


Fig. 14. Each load current.

정상상태에 도달한 후에는 순환전류가 약 40 [A]로 감소하였다. 그림 6을 기준으로 1.2 [°]의 계측 오차를 가질 때의 순환전류 크기와 동일하다.

그림 12는 시뮬레이션 결과를 그림 6의 그래프를 이용하여 나타낸 것이다. 그래프를 통해 제안된 통합제어기의 위상 오차의 보상 정도를 알 수 있다.

그림 13은 그림 8에서 나타난 동작 시간에 따른 각 APC의 dq축 전류의 파형을 나타낸다. t_2 에서 APC가 계통에 투입되어 부하전류와 동일한 전류를 가지게 되며, $t_3 - t_4$ 에서 평균 전류를 계산하여 전류제어기의 지령치를 저장한다. $t_4 - t_5$ 에서 각 계통의 연계를 시작하여 전류 위상이 변하는 것을 알 수 있으며, t_5 에서 다시 $t_3 - t_4$ 구간과 동일한 dq전류가 흐르도록 제어됨을 확인할 수 있다.

그림 14는 두 변전소의 연계 전후의 계통에 끼치는 영향을 보기 위해 나타낸 각 부하의 전류 파형이다. 연계 전후의 부하 전류 변화가 없음을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 신재생 발전원의 비중이 늘어나고 있는 최근 배전선로의 활용을 최대화하기 위해 배전선로의 자율 재구성을 제시하였으며, 이를 위해 능동위상제어기를 적용하여 배전계통 재구성 시 발생하는 순환전류를 최소화하는 운영 방안을 제안하였다. PMU를 통해 연계지점의 전압정보를 기준으로 각 능동위상제어기의 지령치를 계산하는 전압 제어 알고리즘과, PMU의 측정 오차를 보상하기 위한 전류제어 알고리즘을 사용하여 통합제어기를 구성하였다. 또한 PMU의 계측 오차에 따른 순환 전류를 분석하여 통합제어기의 필요성을 확인하였다. 제안한 내용의 타당성은 시뮬레이션을 통해 검증하였으며, 시뮬레이션 결과 PMU의 계측오차가 약 25%로 감소되는 것을 확인하였다.

방사형 등의 구조로 고정되어 있는 기존의 배전계통은 신재생 발전원의 설치 위치와 출력이 제한되지만, 배전선로를 자율 재구성을 할 수 있는 능동배전망은 위 문제를 해결할 수 있는 하나의 방안으로 사료된다.

References

- [1] J. H. Choi and J. C. Kim, "Network reconfiguration at the power distribution system with dispersed generations for loss reduction," in *2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, Jan. 2000.
- [2] M. S. Castro, H. M. Ayres, V. F. da Costa, and L. C. P. da Silva, "Impacts of the SSSC control modes on small-signal and transient stability of a power system," *Electric Power Systems Research*, Vol. 77, pp. 1-9, Jan. 2007.
- [3] N. G. Hingorani and L. Gyugyi, *Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*, IEEE Press, John Wiley & Sons, 2000.
- [4] A. Siddique, Y. Xu, W. Aslam, and M. Rasheed, "A comprehensive study on FACTS devices to improve the stability and power flow capability in power system," in *2019 The Asia Power and Energy Engineering Conference*, May. 2019.
- [5] J. Paserba, "How FACTS controllers benefit AC transmission systems," in *Transmission and Distribution Conference and Exposition, PES 2003*.
- [6] N. Hingorani and L. Gyugyi, "Understanding FACTS, concepts and technology of flexible AC transmission systems," *IEEE Press*, pp. 1-2, 1999.
- [7] A. Singer and W. Hoffman, "Combined system of the static synchronous series compensator and passive filter applied to wind energy conversion system," in *Proceedings of PEDS 2007*, Nov. 2007.
- [8] M. Saradarzadeh, S. Farhangi, J. L. Schanen, P. O. Jeannin, and D. Frey, "Reversing the power flow in the looped electrical distribution network by using a cascaded H-bridge D-SSSC," in *2011 2nd Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference*, Feb. 2011.
- [9] O. Aouchenni, R. Babouri, D. Aouzellag, F. Chabour, and C. Nichita, "Power control with static synchronous series compensator for distribution network integrating wind farm based on DFIGs," *ICREPEQ*, Apr. 2017.
- [10] M. Rastegar, M. Saradarzadeh, S. Farhangi, A. Zare-Sakhvidi, "An improved D-SSSC voltage and current load balancing control strategy under unbalanced load," in *2017 Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, Jul. 2017.
- [11] S. Nema and S. George, "Enhancement of transmittable power using optimal control of SSSC considering X/R ratio of transmission line," in *2019 IEEE PES GTD Grand International Conference and Exposition Asia*, May. 2019.
- [12] H. O. Lee, J. S. Huh, B. K. Kim, D. S. Rho, and J. C. Kim, "Improvement method of SVR control in power distribution system interconnected distributed generator," *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol. 63, No. 2, pp. 224-229, 2014.
- [13] T. Senjyu, Y. Miyazato, A. Yona, N. Urasaki, and T. Funabashi, "Optimal distribution voltage control and coordination with distributed generation," *IEEE Trans. Power Del.*, Vol. 23, No. 2, pp. 1236-1242, Apr. 2008.



김수연(金秀淵)

1993년 1월 27일생. 2019년 전남대 전기공학과 졸업. 2019년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.



정다음(鄭多音)

1989년 2월 14일생. 2015년 인제대 전자공학과 졸업. 2017년 전남대 전기공학과 졸업(석사). 2017년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.



박성준(朴晟濬)

1965년 3월 20일생. 1991년 부산대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 2002년 동 대학원 지능기계공학과 졸업(공학박사). 1996년~2000년 거제대 전기과 조교수. 2000년~2003년 동명대 전기과 조교수. 2003년~현재 전남대 전기공학과 교수. 당 학회 학술위원장.



김동희(金東熙)

1984년 5월 27일생. 2009년 성균관대 전자전기공학과 졸업. 2011년 동 대학원 태양광시스템협동과정 졸업(석사). 2015년 동 대학원 전자전기컴퓨터공학과 졸업(공학박사). 2015년~2016년 성균관대학교 박사후연구원. 2016년~2017년 동명대 전기공학과 조교수. 2017년~현재 전남대 전기공학과 조교수. 당 학회 학술이사.