

# 배전선로 재구성을 위한 능동위상제어기의 용량 선정 연구

정다움<sup>1</sup>, 김수연<sup>1</sup>, 박성준<sup>1</sup>, 김동희<sup>†</sup>

## Study on Capacity Design of Active Phase Controller for Distribution Line Reconfiguration

Da-Woom Jeong<sup>1</sup>, Soo-Yeon Kim<sup>1</sup>, Sung-Jun Park<sup>1</sup>, and Dong-Hee Kim<sup>†</sup>

### Abstract

Distribution energy resources have been increasing in recent years. However, output power is limited for distribution network stability. This study proposes an active distribution network that can reconfigure distribution lines by using an active phase controller. A conventional distribution network has a fixed structure, whereas an active distribution network has a variable structure. Therefore, the latter can increase the output power of distribution energy resources and decrease the overload of distribution line facilities. An active phase controller has two operation modes for minimizing circulating current during dynamic reconfiguration. In this study, voltage and current control algorithms are proposed for active phase controllers. The simulation of the proposed methods for active phase controllers is performed using PSIM software.

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

### 1. 서 론

과거 배전선로에 분산전원 접속 시 선로 특성 변화에 따른 변동성 대응이 취약하여 연계기준법에 따라 접속 허용용량을 제한하였다. 하지만 정부의 “에너지신산업 성과확산 및 규제개혁 종합대책”에 따라, 1[MW] 이하의 소규모 신재생 에너지원은 무제한 계통연계가 가능해졌다. 그로 인해 신재생 발전사업 증가에 따른 배전선로의 분산전원 접속사태가 급증하면서, 송전망에서 배전망으로 전송되는 전력량은 감소하는 반면, 배전망에서 송전망으로 전송되는 전력량이 증가하여, 역조류 현상을 유발하는 배전 혼잡 발생 빈도를 증대시키고 있다<sup>[1],[2]</sup>.

따라서 기존 배전망은 선로의 수요전력증대 및 최대 허용용량초과 등 여러 악조건 상황에서 상시계통운행을 시행하기 위해 높은 여유도를 고려하여 변전소 용량을 설계하였다.

이때, 높은 여유도의 용량 책정 시 과도한 설계 비용이 발생할 뿐만 아니라, 낮은 설비 이용률 및 전체 효율 저하 문제를 초래한다. 또한, 여유도를 높게 선정하였음에도 부하 상태와 분산전원의 출력 변화에 따라 국지적 선로용량 위배 및 변전 측 역조류 현상에 의한 보호협조 문제가 발생한다. 이때, 기존의 경우 변전소를 추가 증설하여 허용용량을 확보하는 등 수동적인 형태의 문제 해결 방안을 제안하였다<sup>[3],[4]</sup>. 따라서 급변하는 선로 상태에 따라 과도한 선로용량 증설 없이, 배전계통을 자율적으로 재구성하는 형태의 능동적인 문제 해결 방안을 검토한다. 이는 선로용량에 여유가 있는 인근 배전선로와 상호협조를 통하여 선로부담경감 및 설비이용률 증대를 이룰 수 있다<sup>[5]</sup>.

배전계통의 자율적 재구성은 계통 토폴로지의 루프(Loop) 및 망(Mesh)을 자유롭게 변경할 수 있어야 한다. 이때, 계통연계 시 연계 지점(Connection Point, CP) 간 전압 및 위상이 서로 상이할 경우, 전위차에 의한 돌입 전류 및 순환 전류가 선로에 야기되어 인근 차단기가 오동작함으로써 국지적 정전이 발생할 수 있다. 따라서 문제의 해결 방안으로, 본 논문에서는 실시간으로 선로 전압 및 위상 가변이 가능한 3상 연계형 인버터 기반의 능동 위상 제어기(Active Phase Controller, APC)를 제안한다.

Paper number: TKPE-2020-25-5-5

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

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

<sup>1</sup> Dept. of Electrical Engineering, Chonnam Nat'l University  
Manuscript received Mar. 2, 2020; revised Apr. 6, 2020;  
accepted Apr. 27, 2020

연계 직전, 선로 간 전압 및 위상 일치 시, 변전소 출력단 전압의 제어가 요구되지만, 사용자가 임의로 제어할 수 없다. 따라서, SSSC(Static Synchronous Series Compensator) 토폴로지 기반의 APC를 구성한다<sup>[6]-[8]</sup>. APC는 외부의 직류 전원 공급 장치로부터 내부 인버터에 입력 전원으로 인가하여 3상 교류 전원으로 가변한다. 변압기를 통하여 선로에 3상 교류 전원(직렬 보상 전압,  $V_C$ )을 직렬로 삽입함으로써, 전압 강하로 인한 연계 지점 간 전압 및 위상을 일치시킨다<sup>[9],[10]</sup>.

이때, 직렬 보상 전압의 지령 값과 부하 임피던스의 크기 변화에 따라 APC의 출력 용량이 상이하게 나타난다. APC의 정격 출력 용량을 초과할 경우 수명 저하와 유지 보수에 악영향을 미친다. 따라서, 제안하는 수식을 통해 APC 운용 시 최적 연계 지점을 산출하여 효율적인 운전이 가능하며, APC 설계 시 최소 용량 지점을 선정하여 단가 절감에 기여한다. 또한, 시뮬레이션의 결과로부터 제안하는 수식의 타당성을 검증한다.

## 2. 본 론

### 2.1 직렬 보상 전압( $V_C$ )과 연계 지점 전압( $V_{CP}$ ) 관계

그림 1은 직렬 보상 전압( $V_C$ )과 연계 지점 전압( $V_{CP}$ )의 관계 해석을 위해 배전선로를 간단히 도식화하였다. 변전소( $V_S$ )와 직렬로 APC 구축 후 선로에 직렬 보상 전압을 인가하여, 전압 강하로 인한 연계 지점 간 전압 및 위상을 일치시킨다. 이때, 연계 지점의 전압 및 위상은 부하 임피던스( $Z_L$ )에 인가되는 전압 및 위상과 병렬 접속으로써 동일한 값을 가지며, 위상 측정 장치(Phasor Measurement Unit, PMU)를 통해 계측할 수 있다. 또한, 변전소와 직렬로 선로 임피던스( $Z_{L1}$ ,  $Z_{L2}$ ,  $Z_{L3}$ ), 병렬로 부하 임피던스( $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $Z_3$ )가 존재하며, 선로 추가 증설 및 최대 부하 변동이 없다고 가정할 시, 각각의 임피던스 및 역률은 상수 취급할 수 있다.

수치 해석을 위해 테브난의 정리로부터 간략화된 등가 회로도를 나타낸다. 변전소와 APC는 직렬로 접속되어 있으므로, 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$V'_S = V_S + V_C \quad (1)$$

테브난 등가 전압( $V_T$ )은 식 (2)와 같다.

$$V_T = \frac{\left( \frac{\left( \frac{(Z_3 + Z_3) \times Z_2}{(Z_3 + Z_3) + Z_2} \right) \times Z_1}{\left( \frac{(Z_3 + Z_3) \times Z_2}{(Z_3 + Z_3) + Z_2} \right) + Z_1} \right)}{\left( \frac{\left( \frac{(Z_3 + Z_3) \times Z_2}{(Z_3 + Z_3) + Z_2} \right) + Z_{L2} \right) \times Z_1}{\left( \frac{(Z_3 + Z_3) \times Z_2}{(Z_3 + Z_3) + Z_2} \right) + Z_{L2} + Z_1} \right)} \times V'_S \quad (2)$$

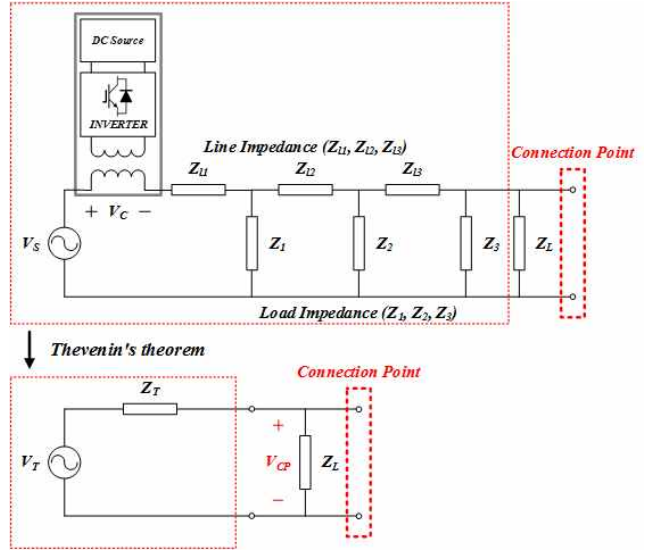


Fig. 1. Equivalent circuit for voltage calculation of connection point.

테브난 등가 임피던스( $Z_T$ )는 식 (3)과 같다.

$$Z_T = \frac{\left( \frac{\left( \frac{\left( \frac{Z_{L1} \times Z_1}{Z_{L1} + Z_1} \right) + Z_{L2} \right) \times Z_2}{\left( \frac{Z_{L1} \times Z_1}{Z_{L1} + Z_1} \right) + Z_{L2} + Z_2} \right) + Z_{L3} \right) \times Z_3}{\left( \frac{\left( \frac{\left( \frac{Z_{L1} \times Z_1}{Z_{L1} + Z_1} \right) + Z_{L2} \right) \times Z_2}{\left( \frac{Z_{L1} \times Z_1}{Z_{L1} + Z_1} \right) + Z_{L2} + Z_2} \right) + Z_{L3} + Z_3} \right)} \quad (3)$$

이때, 테브난의 등가 전압 및 임피던스로부터 전압 분배 시 부하 임피던스( $Z_L$ )의 인가 전압을 계산할 수 있다. 즉, 제어하고자 하는 연계 지점 전압은 식 (4)와 같다.

$$V_{CP} = \frac{Z_L}{Z_L + Z_T} \times V_T \quad (4)$$

이때, 식 (4)에 식 (2), (3)을 대입하면 식 (5)와 같다.

$$V_{CP} = \frac{Z_L}{Z_L + Z_T} \times \frac{\left( \frac{\left( \frac{\left( \frac{(Z_3 + Z_3) \times Z_2}{(Z_3 + Z_3) + Z_2} \right) + Z_{L2} \right) \times Z_1}{\left( \frac{(Z_3 + Z_3) \times Z_2}{(Z_3 + Z_3) + Z_2} \right) + Z_{L2} + Z_1} \right)}{\left( \frac{\left( \frac{(Z_3 + Z_3) \times Z_2}{(Z_3 + Z_3) + Z_2} \right) + Z_{L2} \right) \times Z_1}{\left( \frac{(Z_3 + Z_3) \times Z_2}{(Z_3 + Z_3) + Z_2} \right) + Z_{L2} + Z_1} \right)} \times V'_S \quad (5)$$

앞서 언급한 바와 같이, 선로 및 부하 임피던스가 항상 일정하다고 가정한다면, 식 (6)과 같이 하나의 등가 상수( $Z_{Total}$ )로써 대체할 수 있다.

$$V_{CP} = Z_{Total} \times V'_S \quad (6)$$

식 (6)은 크기만 고려한 스칼라값으로, 위상까지 고려한 벡터값으로 표현 시, 식 (7)과 같다.

$$V_{CP} \angle \theta_{CP} = Z_{Total} \angle \theta_{Total} \times V'_S \angle \theta'_S \quad (7)$$

따라서, 연계 지점 전압의 크기 및 위상을 식 (8)과 같이 표현할 수 있다.

$$V_{CP} \angle \theta_{CP} = (Z_{Total} \times V'_S) \angle (\theta_{Total} + \theta'_S) \quad (8)$$

식 (8)에서  $Z_{Total}$ 은 상수 취급되며 제어 시 고려 대상이 아니다. 따라서, 연계 지점 전압의 크기 및 위상은 식 (1)의 변전소 전압과 직렬 보상 전압의 합인,  $V'_S$ 의 크기 및 위상 변화에 선형적으로 비례하여 증·감한다. 이때, 전압과 위상은 서로의 변화에 무관한 함수이다.

### 2.2 연계 지점 전압의 지령 값 변화에 따른 제어기 이용률

그림 2는 배전 선로 간 연계 상황을 간략하게 도식화하였다. PMU를 통해 연계 지점 양단의 전압 및 위상을 측정하여 APC에 인가한다. 제안하는 수식으로부터 직렬 보상 전압을 산출하여 선로에 투입함으로써 선로 간 전압 및 위상을 일치시킨다.

그림 3은 배전 선로의 연계 상황을 벡터도로 나타낸다.  $V_{CP}$ 에서 양단의 전압 및 위상이 일치함을 알 수 있다. 각각의 변전소 전압은 22.9[kV]로써 동일하며, 변전소#1의 위상은 0°, 변전소#2의 위상은 10°로써, 변전소 간 위상차를 10°로 설정하였다. 이때, 시스템에서 선로 임피던스의 영향이 미미하므로 무시하여 해석하였다. 또한, 개폐기 투입 이전에 직렬 회로의 특성상 제어기에 유입되는 전류( $I_C$ ), 선로 전류 및 부하 전류는 항상 동일하다. 벡터도에서 직렬 보상 전압은 연계 지점 전압과 변전소 전압의 차로 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V_C \angle \theta_C = V_{CP} \angle \theta_{CP} - V_S \angle \theta_S \quad (9)$$

오일러 공식을 통해 식 (10)과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{V}_C = (V_{CP} \cos \theta_{CP} + j V_{CP} \sin \theta_{CP}) - (V_S \cos \theta_S + j V_S \sin \theta_S) \quad (10)$$

식 (11)과 (12)는 식 (10)으로부터 직렬 보상 전압의 크기 및 위상을 표현한 수식이다.

$$V_C = \sqrt{V_{CP}^2 + V_S^2 - 2 V_{CP} V_S \cos(\theta_{V_{CP}} - \theta_{V_S})} \quad (11)$$

$$\theta_{V_C} = \tan^{-1} \left( \frac{V_{CP} \sin \theta_{V_{CP}} - V_S \sin \theta_{V_S}}{V_{CP} \cos \theta_{V_{CP}} - V_S \cos \theta_{V_S}} \right) \quad (12)$$

식 (11)과 (12)를 통해 직렬 보상 전압의 크기 및 위상은 부하 임피던스의 크기 및 역률 변화에 무관한 함수

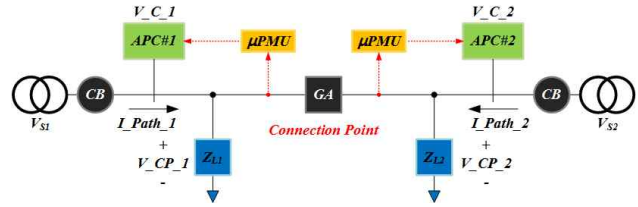


Fig. 2. Configuration of distribution line for system analysis.

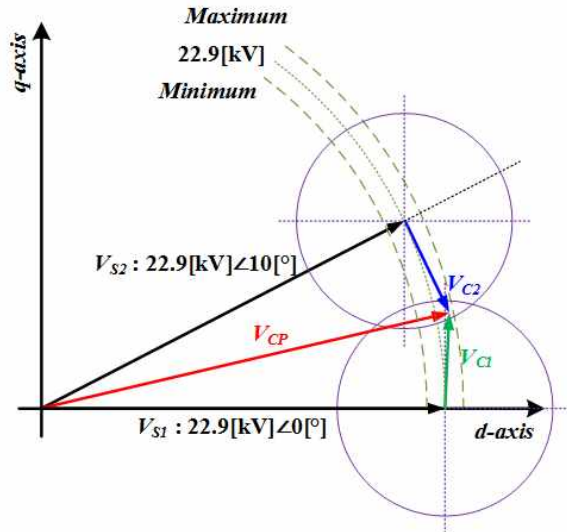


Fig. 3. Vector diagram of distribution line state.

임을 알 수 있다.

제어기에 유입되는 전류는 부하 전류와 같으므로 식 (13), (14)와 같이 표현할 수 있다.

$$I_C = \frac{1}{Z_L} \sqrt{V_S^2 + V_C^2 + 2 V_S V_C \cos(\theta_{V_S} - \theta_{V_C})} \quad (13)$$

$$\theta_{I_C} = \tan^{-1} \left( \frac{V_S \sin(\theta_{V_S} - \theta_{Z_L}) + V_C \sin(\theta_{V_C} - \theta_{Z_L})}{V_S \cos(\theta_{V_S} - \theta_{Z_L}) + V_C \cos(\theta_{V_C} - \theta_{Z_L})} \right) \quad (14)$$

식 (13)에서 제어기에 유입되는 전류의 크기는 부하 임피던스의 크기에 반비례하여 증감하지만, 역률 변화에 무관한 함수이다.

식 (14)에서 제어기에 유입되는 전류의 위상은 부하 임피던스의 역률에 반비례하여 증감하지만, 크기 변화에 무관한 함수이다. 따라서, 제어기에 유입되는 전류는 부하 임피던스와 상관관계가 있음을 알 수 있다. 이때, APC의 설계 용량은 식 (15)와 같다.

$$P_a [VA] = V_C \times I_C \quad (15)$$

식 (15)와 같이 APC의 출력량( $P_a$ )은 전압과 전류의 위상차와 무관한 함수이므로, 부하 임피던스의 역률 변화에 아무런 영향을 받지 않는다.

이때, x 축은 연계 지점 간 전압 위상 일치 지점이며, y 축은 능동 위상 제어기의 출력량을 나타낸다.

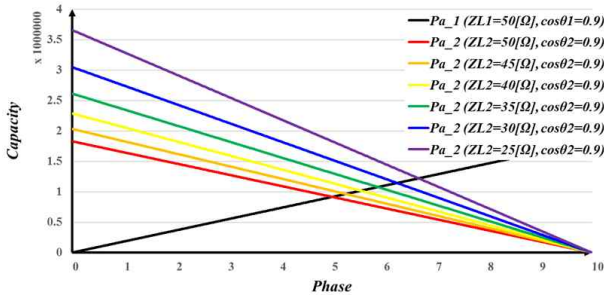


Fig. 4. APC capacity by varying load impedance under  $Z_{L2}$  power factor lagging 0.9.

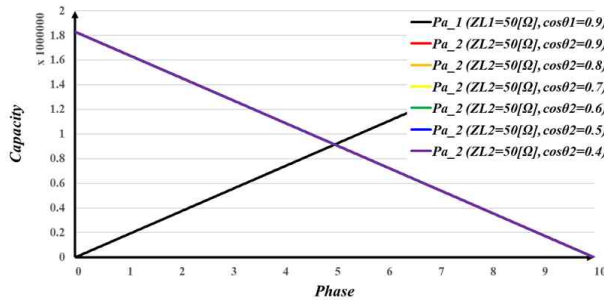


Fig. 5. APC capacity by varying power factor under constant load impedance  $Z_{L2}$  50[Ω].

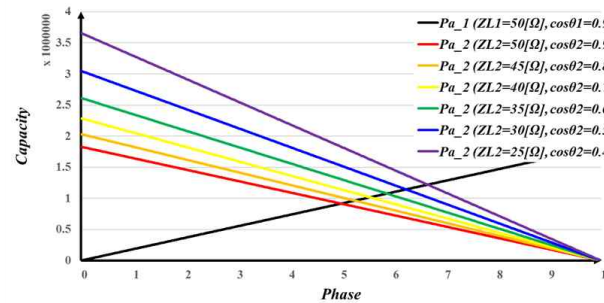


Fig. 6. Load impedance & power factor variation.

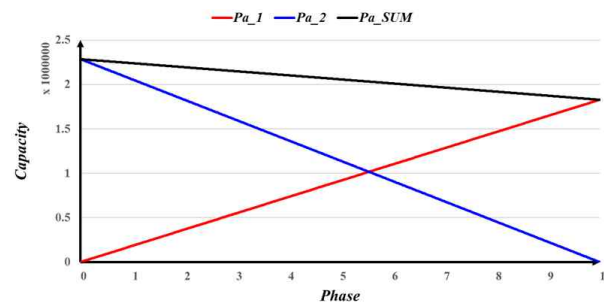


Fig. 7. Total APC capacity according to load & PF variation.

배전 선로에서 유도성 부하가 많은 비중을 차지하고 있으므로 지상 부하를 중점으로 실험하였으며, 해석의 편의상 부하 임피던스( $Z_{L1}$ )의 크기 및 역률은 각각 50 [Ω], 0.9로 고정하고, 표 1과 같이 부하 임피던스( $Z_{L2}$ )는 3가지 상황을 고려하여 Excel을 통해 비교 분석하였다.

TABLE I  
CAPACITY OF APC ACCORDING TO VARIOUS CONDITIONS

CASE#1						
Load#1	Z=50 [Ω], PF=0.9					
Load#2 [Ω]	50	45	40	35	30	25
Phase [°]	5.00	5.26	5.56	5.88	6.25	6.67
Power[MVA]	1.83	1.92	2.03	2.15	2.29	2.44
CASE#2						
Load#1	Z=50 [Ω], PF=0.9					
Load#2 [PF]	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4
Phase [°]	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
Power [MVA]	1.83	1.83	1.83	1.83	1.83	1.83
CASE#3						
Load#1	Z=50 [Ω], PF=0.9					
Load#2 [Ω/PF]	50/0.9	45/0.8	40/0.7	35/0.6	30/0.5	25/0.4
Phase [°]	5.00	5.26	5.56	5.88	6.25	6.67
Power [MVA]	1.83	1.92	2.03	2.15	2.29	2.44

TABLE II  
DISTRIBUTION LINE PARAMETERS

10 [MW]	V		θ	
Substation#1	22.9 [kV]		0 [°]	
Substation#2	22.9 [kV]		10 [°]	
	Z	PF	R	L
Load#1	50 [Ω]	0.9	45 [Ω]	57.81 [mH]
Load#2	40 [Ω]	0.7	28 [Ω]	75.77 [mH]

그림 4는 부하 임피던스( $Z_{L2}$ )의 역률을 0.9로 고정 시, 크기 감소에 따른 APC의 출력을 나타낸다. 식 (13)의 결과를 토대로 부하 임피던스의 크기 경감에 따라 제어기에 유입되는 전류의 크기가 증가하여 APC#2의 출력량 기울기가 증가함을 알 수 있다.

그림 5는 부하 임피던스( $Z_{L2}$ )의 크기를 50[Ω]으로 고정 시, 역률 감소에 따른 APC의 출력을 나타낸다. 식 (15)의 결과를 토대로 부하 임피던스의 역률 변화에 따른 전압과 전류의 위상차가 증감은, APC#2의 출력량 변화에 영향을 미치지 못하고 항상 일정함을 알 수 있다.

그림 6은 부하 임피던스( $Z_{L2}$ )의 크기 및 역률 모두 가변 되는 상황을 나타낸다. 그림 5와 같이 부하 임피던스의 역률 변화는 APC#2의 출력량에 영향을 미치지 못하므로, 그림 4와 같은 결과를 도출한다.

그림 7은 표 2와 같이 시뮬레이션에서 적용한 파라미터를 토대로 APC#1과 APC#2의 이용률을 나타낸다. 두 배전 선로 간 전압 위상을 0[°]에서 일치 시, APC#1은 동작하지 않으므로 출력량이 0[MVA]이며, APC#2만



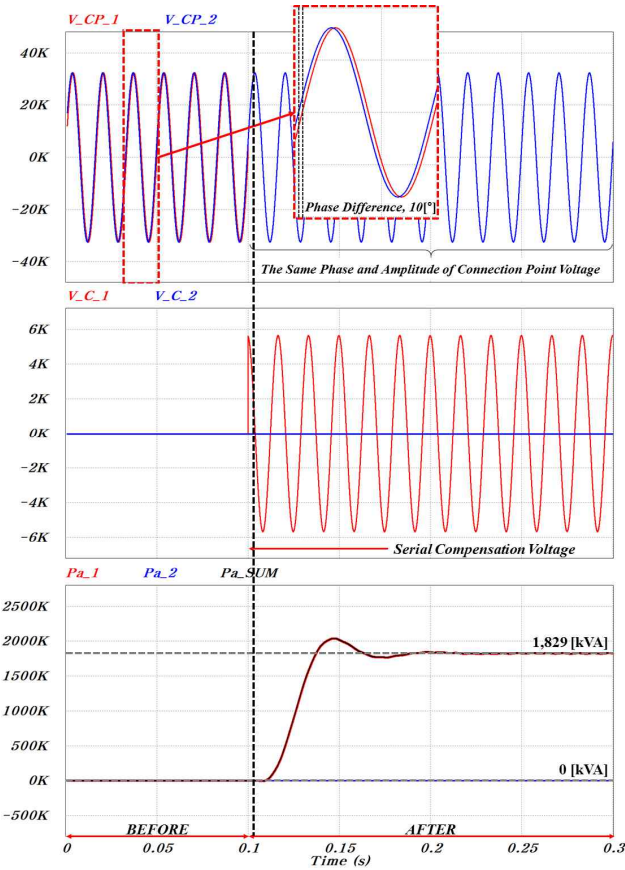


Fig. 8. Connection point voltage and APC capacity at controlled angle as  $10^\circ$ .

구동하여 전압 위상을 일치시킴으로써, 전체 APC의 합성 용량은 약 2.28[MVA]로 가장 높게 측정된다.

$10^\circ$ 에서 일치 시, APC#2는 동작하지 않으므로 출력량이 0[MVA]이며, APC#1만 구동하여 전압 위상을 일치시킴으로써, 전체 APC의 합성 용량은 약 1.83[MVA]으로 가장 낮게 측정된다. 따라서, 위상을  $10^\circ$ 에서 일치할 경우 가장 낮은 APC 합성 용량 얻을 수 있지만, APC#1에서 모든 부담을 수용하여야 하므로 효율적인 운영이 어렵다. 만약, 단 한 대의 APC만 구축할 시, 변전소#1 측에 설계하는 것이 용이하다.

반면, APC#1과 APC#2의 출력량이 같아지는 지점인  $5.56^\circ$ 에서 전압 위상 일치 시, 합성 용량은 2.03[MVA]로써 1.83[MVA]보다 높게 측정되지만, APC의 출력량이 약 1.02[MVA]로써 같으므로 효율적인 운용이 가능하다.

따라서 출력량이 한쪽으로 치중되지 않고 일정하게 분담할 수 있는 전압 위상 일치 지점을 도출하는 것이 중요하다. 이때, 그림 7과 같이 APC의 출력 특성 곡선이 교차 되는 지점에서 출력량이 일치하므로, APC#1과 APC#2의 설계 용량이 같음을 식 (16)과 같이 표현된다.

$$P_{a_1} = V_{C_1} I_{C_1} = V_{C_2} I_{C_2} = P_{a_2} \quad (16)$$

연계 직전, 그림 2로부터 각각의 직렬 보상 전압은 연계

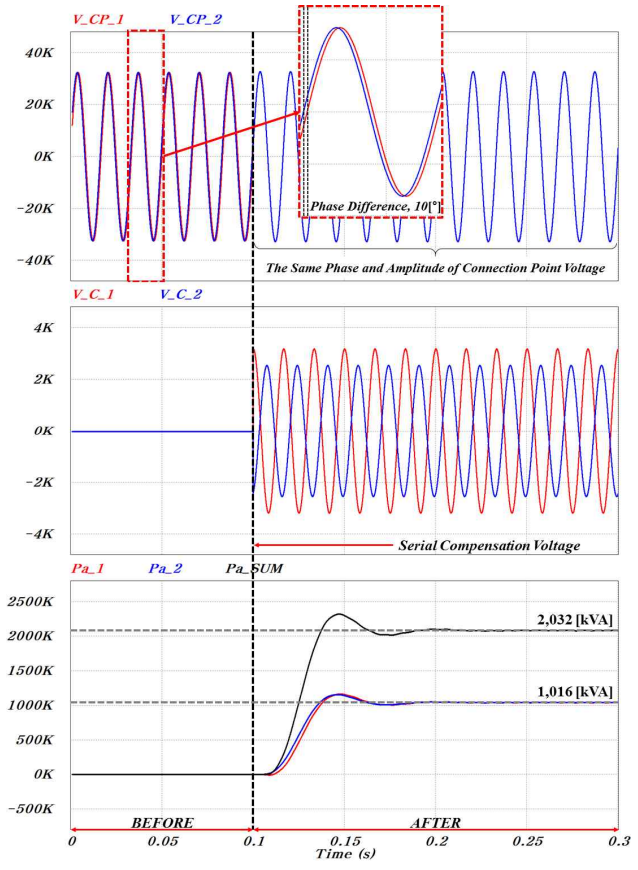


Fig. 9. Connection point voltage and APC capacity at controlled angle as  $5.56^\circ$ .

지점 전압과 변전소 전압의 차( $V_C = V_{CP} - V_S$ )로 나타낼 수 있으며, 직렬 회로의 특성상 제어기에 유입되는 전류( $I_C$ )는 부하 전류와 같으므로, 옴의 법칙으로부터 제어기에 유입되는 전류( $I_C = \frac{V_{CP}}{Z_L}$ )를 구할 수 있다.

따라서, 식 (16)을 식 (17)과 같이 표현할 수 있다.

$$(V_{CP} - V_{S_1}) \times \frac{V_{CP}}{Z_{L_1}} = (V_{CP} - V_{S_2}) \times \frac{V_{CP}}{Z_{L_2}} \quad (17)$$

식 (17)을  $V_{CP}$ 에 관한 함수로 표현하면, 식 (18)과 같이 최적의 연계 지점 전압을 표현할 수 있다.

$$V_{CP} = \frac{Z_{L_2} V_{S_1} - Z_{L_1} V_{S_2}}{Z_{L_2} - Z_{L_1}} \quad (18)$$

식 (18)을 식 (11), (12)에 대입하여 계산된 지령 값을 APC에 인가 시, 대략  $5.56^\circ$ 에서 두 APC의 이용률이 약 1.02[MVA]로 서로 일치함을 알 수 있었다.

### 3. 시뮬레이션 검증

PSIM 시뮬레이션을 사용하여 제안하는 수직의 타당성을 검증한다. 식 (18)에 의해 계산된 연계 지점 전압

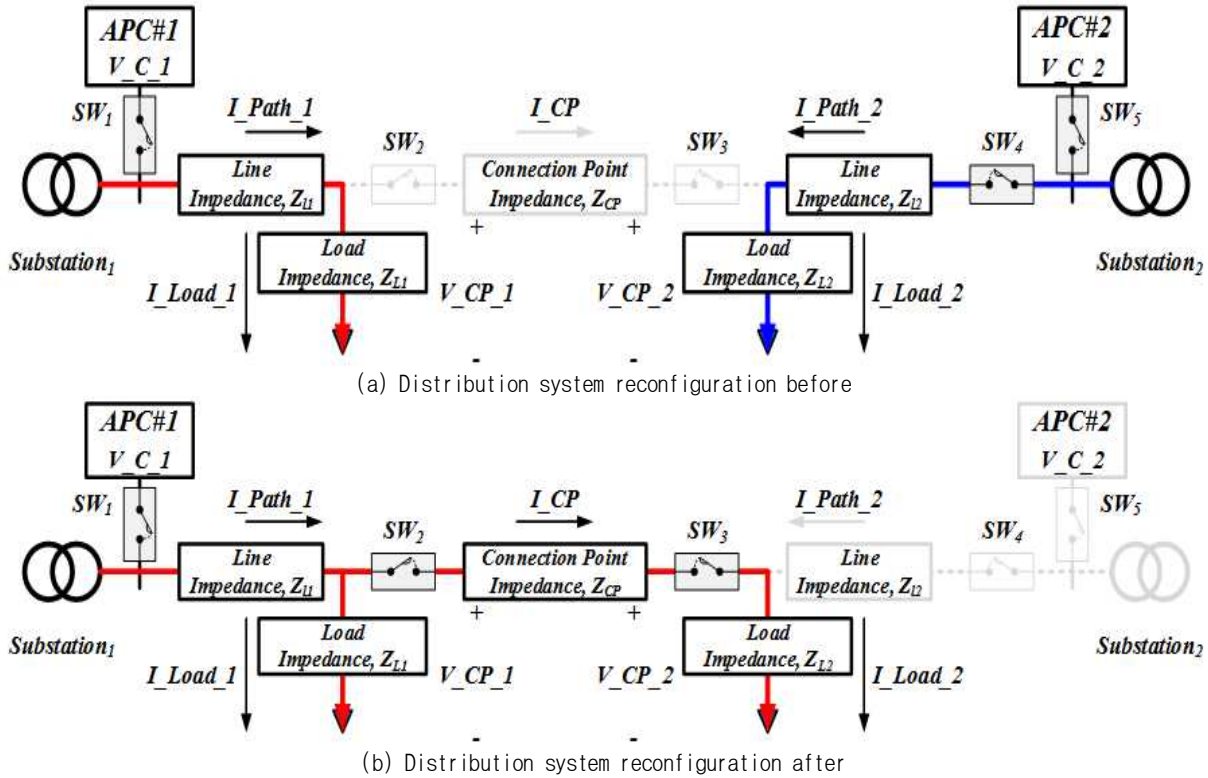


Fig. 10. Autonomous reconstruction of the distribution system by APC inverter.

의 지령 값에 따라 APC의 출력량을 계측한다. 연계 지점 간 전압 위상 일치 지점을 각각 5.56[°] 및 10[°]로 설정하였다. 0.1[s] 경과 후, APC를 통해 선로에 직렬 보상 전압을 투입한다. 표 2와 같이 변전소 간 전압의 크기는 22.9[kV]로써 동일하며, 10[°]의 위상차를 갖는다. 표 1의 CASE#3에서 하나의 상황을 반영하여 부하 임피던스( $Z_{L1}$ )의 크기 및 역률 50[Ω], 0.9, 부하 임피던스( $Z_{L2}$ )의 크기 및 역률 40[Ω], 0.7로 설정하였다.

그림 8은 전압 위상 일치 지점을 10[°]에서 설정 시 나타나는 시뮬레이션 결과 파형이다. 이때, 연계 지점 전압( $V_{CP2}$ )의 위상은 10[°]에 위치하여 APC#2는 구동되지 않아 직렬 보상 전압( $V_{C2}$ )은 0[V]이며, APC의 합성 용량은 1,829[kVA]로 가장 낮게 측정된다. 따라서 단 한 대의 APC 이용 시, APC#1를 고려하여 제작할 경우 가장 낮은 용량으로 구축할 수 있다.

그림 9는 전압 위상 일치 지점을 5.56[°]에서 설정 시 나타나는 시뮬레이션 결과 파형이다. 선로 간 연계 지점 전압( $V_{CP}$ )이 일치하며, APC의 이용률이 1,016[kVA]로써 동일함을 알 수 있다. 합성 용량은 2,032[kVA]로써 10[°]인 경우보다 높은 값을 가지지만, APC의 출력이 균등분배되어 효율적인 운영이 가능하다.

그림 10은 선로의 자율적 재구성 전·후를 기준으로 전력 전달 방향을 나타내며, 스위치 동작 상태에 따라 선로 상황이 변화한다.

선로의 자율적 재구성 이전에는 부하 임피던스  $Z_{L1}$ ,  $Z_{L2}$ 이 각각의 변전소#1, 변전소#2로부터 전력을 공급받

고 있음을 알 수 있다.

**Mode 1 (0- $t_1$ ):** 연계 지점 간 전압 및 위상을 일치시키기 위해, SW<sub>1</sub>, SW<sub>5</sub>이 Turn-On 되어 선로에  $V_{C1}$ ,  $V_{C2}$ 가 인가됨으로써  $V_{CP1}$ 과  $V_{CP2}$ 가 같아진다.

**Mode 2 ( $t_1$ - $t_2$ ):** SW<sub>2</sub>, SW<sub>3</sub>이 Turn-On 되어 계통 간 연계가 이루어진다. 이때, 연계 지점 간 전압 및 위상이 일치하여 전위차가 0[V]이므로, 연계 지점 전류( $I_{CP}$ )는 0[A]이다.

**Mode 3 ( $t_2$ - $t_3$ ):** SW<sub>4</sub>, SW<sub>5</sub>를 Turn-Off 되어 계통의 재구성이 완료된다. 이때, 변전소#1 측에 부하 임피던스( $Z_{L2}$ )가 병렬 접속됨에 따라 전체 임피던스가 감소하여, 선로 전류( $I_{Path1}$ )가 증가한다.

**Mode 4 ( $t_3$ - $t_4$ ):** 계통 재구성이 완료되었으므로, SW<sub>1</sub>를 Turn-Off 되어 APC#1의 투입을 중단한다.

**Mode 5 ( $t_4$ - $t_5$ ):** 임의로 SW<sub>3</sub> Turn-Off 시 변전소#1 측의 전체 임피던스가 복구되어 선로 전류( $I_{Path1}$ )가 원래대로 감소한다.

실험 결과로부터 변전소 출력단 전압에 대비 부하에 인가되는 전압의 크기 변화량이 미소하여, 부하에 유입되는 전류의 크기가 항상 일정함을 알 수 있었다.

#### 4. 결 론

본 논문은 선로의 자율적 재구성 시, 연계 지점 간 전위차에 의해 발생하는 순환전류 억제에 대해, 선로의 전압 및 위상을 능동적인 제어가 가능한 3상 인버터 기반의 APC 용량 산출 기법에 대해 서술하였다.

APC 설계 시 경로 임피던스의 크기 변화에 따라, APC에 유입되는 전류의 크기가 반비례하여 증감하므로 APC 출력량 증대에 크게 관여하였다. 또한, 제어되는 연계 지점 양단 전압의 크기 및 위상 변화에 따라 APC의 설계 용량이 상이하게 산출되었다. 따라서 제안하는 수식을 통해 APC 운용 시 최적 연계 지점을 검출하여 효율적인 운전이 가능하였으며, APC 설계 시 최소 용량 지점을 선정하여 단가 절감에 기여한다. 또한, 시뮬레이션을 사용하여 제안하는 제어 기법의 타당성을 검증하였다.

본 연구는 한국전력공사의 2018년 착수 에너지 거점대학 클러스터 사업에 의해 지원되었음. (과제 번호: R18XA04)

#### References

- [1] D. Li, S. Wang, J. Zhan, and Y. Zhao, "A self-healing reconfiguration technique for smart distribution networks with DGs," in *2011 International Conference on Electrical and Control Engineering*, pp. 4318-4321, Sep. 2011.
- [2] Q. Li, W. Ding, J. Zhang, and A. Liu, "A new reconfiguration approach for distribution system with distributed generation," in *2009 International Conference on Energy and Environment Technology*, pp. 23-26, Oct. 2009.
- [3] H. Azadi, B. Akbari, and M. S. Sepasian, "Power quality enhancement in distribution systems using feeder reconfiguration," in *2018 Smart Grid Conference (SGC)*, pp. 1-6, Nov. 2018.
- [4] H. Yang, Y. Peng, and N. Xiong, "Gradual approaching method for distribution network dynamic reconfiguration," in *2008 Workshop on Power Electronics and Intelligent Transportation System*, pp. 257-260, Aug. 2008.
- [5] Y. Su, N. Zhou, Q. Wang, and T. Wang, "Allowable capacity calculation of distributed generation in different distribution network," in *2017 Asian Conference on Energy, Power and Transportation Electrification (ACEPT)*, pp. 1-5, Oct. 2017.
- [6] S. A. Kumar, C. Easwarlal, and M. S. Kumar, "Multi machine power system stability enhancement using Static Synchronous Series Compensator (SSSC)," in *2012 International Conference on Computing, Electronics and*

*Electrical Technologies (ICCEET)*, pp. 212-217, Mar. 2012.

- [7] S. Amara and H. A. Hsan, "Power system stability improvement by FACTS devices: A comparison between STATCOM, SSSC and UPFC," in *2012 First International Conference on Renewable Energies and Vehicular Technology*, pp. 360-365, Mar. 2012.
- [8] K. R. Hridya, V. Mini, R. Visakhan, and A. A. Kurian, "Comparative study of voltage stability enhancement of a grid and loss reduction using STATCOM and SSSC," in *2015 International Conference on Power, Instrumentation, Control and Computing (PICC)*, pp. 1-4, Dec. 2015.
- [9] R. R. Sawant and Y. S. Rao, "A discrete-time controller for Phase Shift Controlled load-resonant inverter without PLL," in *2014 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, pp. 1-4, Dec. 2014.
- [10] D. Pavković, Y. Kozhushko, M. Hrgetić, D. Zorc, and M. Cipek, "Damping optimum design of single-phase inverter synchronization and current control system," in *2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, pp. 572-577, Apr. 2019.

#### 정다음(鄭多音)



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

#### 김수연(金秀淵)



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

#### 박성준(朴晟濬)



1965년 3월 20일생. 1991년 부산대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 2002년 동 대학원 지능기계공학과 졸업(공학). 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(공학). 2015년~2016년 동 대학원 박사후연구원. 2016년~2017년 동명대 전기공학과 조교수. 2017년~현재 전남대 전기공학과 부교수. 당 학회 학술위원.