

# 직병렬 임피던스 보상을 통한 계통 연계 분산전원 인버터의 PCC 무효전력 제어 알고리즘

허철영<sup>1</sup>, 송승호<sup>†</sup>, 김용래<sup>1</sup>

## Reactive Power Control Algorithm of Grid-Connected Inverter at the Point of Common Coupling With Compensation of Series and Parallel Impedances

Cheol-Young Heo<sup>1</sup>, Seung-Ho Song<sup>†</sup>, and Yong-Rae Kim<sup>1</sup>

### Abstract

Due to space and geographical constraints, the power source may be located outside the island area, resulting in the considerable length of transmission line. In these cases, when an active power is transmitted, unexpected reactive power is generated at a point of common coupling (PCC). Unlike the power transmitted from the power generation source, the reactive power adversely affects the system. This study proposes a new algorithm that controls reactive power at PCC. Causes of reactive power errors are separated into parallel and series components, which allows the algorithm to compensate the reactive current of the inverter output and control reactive power at the PCC through calculations from the impedance, voltage, and current. The proposed algorithm has economic advantages by controlling the reactive power with the inverter of the power source itself, and can flexibly control power against voltage and output variations. Through the simulation, the algorithm was verified by implementing a power source of 3 [kVA] capacity connected to the low voltage system and of 5 [MVA] capacity connected to the extra-high voltage system. Furthermore, a power source of 3 [kVA] capacity inverter is configured and connected to a mock grid, then confirmed through experiments.

**Key words:** Grid connected inverter system, Reactive power control, PCC (Point of Common Coupling), Parallel impedance, Series impedance

### 1. 서 론

재생 발전에너지의 규모가 10년 동안 빠르게 성장해 왔다. 그중 태양광하고 풍력이 큰 비중을 차지하며, 전력전자 장치를 통해 송전망에 연결된다.

공간의 제약 혹은 지리적 제약으로 발전소가 도서 지역 및 외진 지역에 위치하게 되어, 송전 선로의 길이가 길어지는 상황이 발생한다<sup>[1],[2]</sup>. 따라서 시스템을 이상적

인 계통 시스템으로 보기 어렵다<sup>[3]</sup>. 이상적 계통이 아니라는 것은 발전원과 계통 사이의 임피던스가 증가하는 것을 의미하며, 무효전력을 발생시키는 요소는 고조파 필터, 변압기 임피던스, 송전 선로 임피던스를 포함한다.

이러한 요소는 계통 연계에 문제를 일으킨다. 발전원과 계통 사이의 임피던스에 의해 인버터에서 유효전력을 출력할 때 계통 측에서 측정 기준이 되는 공통 연계 지점(Point of Common Coupling, PCC)에서 유효전력 이외의 의도치 않은 무효전력 또한 나타나게 된다. 이는 인버터 출력전력( $P_{PLL}$ ,  $Q_{PLL}$ )과 PCC의 전력( $P_{PCC}$ ,  $Q_{PCC}$ ) 오차를 의미하며 인버터 전압, 전류 센서가 있는 인버터 출력단과 발전원 사이의 임피던스가 존재하기 때문이다. 이렇게 발생한 무효전력은 전력 손실증가, 최대 송전용량 감소, 시스템 안정도 하락, 과도한 무효전력 요구사항으로 계통에 악영향을 미친다<sup>[4]-[9]</sup>. 신재생 에너지의 계통 연계가 증가함에 따라 분산 전원을 계통에 연계하

Paper number: TKPE-2022-27-2-2

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

<sup>†</sup> Corresponding author: ssh7sy@kw.ac.kr, Dept. of Electronic Engineering, Kwangwoon University, Korea  
Tel: +82-2-940-5762 Fax: +82-2-940-5141

<sup>1</sup> Dept. of Control & Instrumentation Engineering Team, Kwangwoon University, Korea  
Manuscript received Oct. 6, 2021; revised Nov. 1, 2021; accepted Nov. 30, 2021



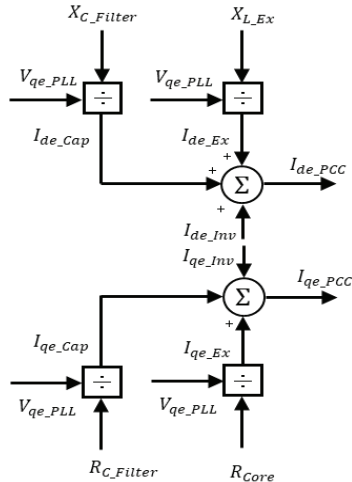


Fig. 3. Parallel compensation block diagram.

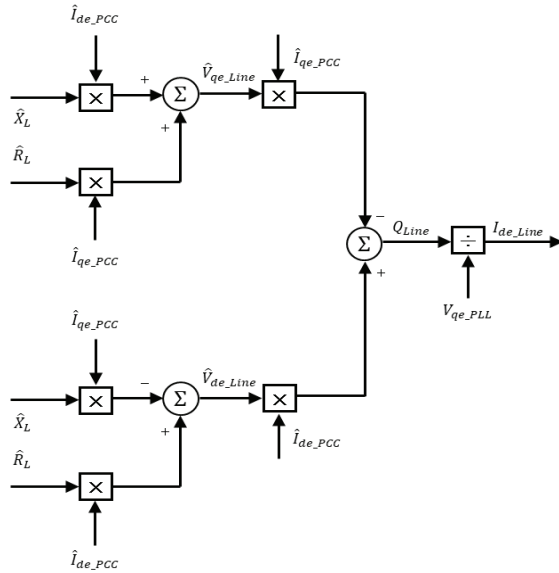


Fig. 4. Series compensation block diagram.

그림 3은 앞선 식을 통해 병렬 보상전류를 계산하는 과정이다. 식 (5)를 통해 병렬 보상전류를 계산할 수 있다.

$$I_{de\_Cap} = \frac{E_d R_{cap} + E_q X_{cap}}{R_{cap}^2 + X_{cap}^2}, \quad I_{de\_Ex} = \frac{E_d R_{core} + E_q X_{Ex}}{R_{core}^2 + X_{Ex}^2} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} I_{de\_PCC} &= I_{de\_Inv} + I_{de\_Cap} + I_{de\_Ex} \\ I_{qe\_PCC} &= I_{qe\_Inv} + I_{qe\_Cap} + I_{qe\_Ex} \end{aligned} \quad (6)$$

$$Z_L = R_L + jX_L \quad (\text{Transmission Line Impedance}) \quad (7)$$

$$\begin{aligned} V_{Line} &= V_{de\_Line} + V_{qe\_Line} \\ V_{de\_Line} &= (-I_{qe\_PCC} \times X_{Line}) + (I_{de\_PCC} \times R_{Line}) \\ V_{qe\_Line} &= (I_{de\_PCC} \times X_{Line}) + (I_{qe\_PCC} \times R_{Line}) \end{aligned} \quad (8)$$

그림 4는 직렬성분 보상전류를 계산하는 블록도이다. PCC에 흐르는 전류를 정확히 계산하기 위해 병렬성분에 의해 손실되는 전류를 식 (6)을 통해 계산하여 전류

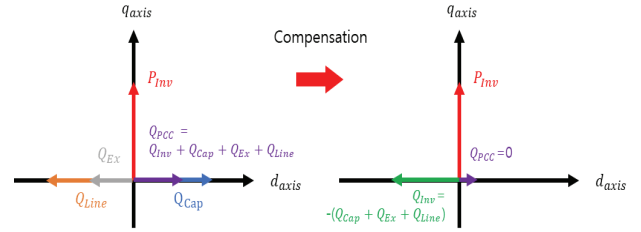


Fig. 5. Comparison of reactive power before and after applying the compensation for reactive power.

$I_{de\_PCC}$ 와  $I_{qe\_PCC}$ 를 얻는다.  $V_{Line}$ 은 변압기와 계통을 연계하는 선로에 발생하는 전압강하 성분이며, 동기좌표계 기준으로  $V_{de\_Line}$ 과  $V_{qe\_Line}$ 로 나눌 수 있다. 식 (7)은 직렬성분 선로 임피던스이며, 식 (6)과 계산하여 식 (8)의 선로전압을 계산한다.

$$Q_{Line} = \frac{3}{2} \times [(I_{de\_PCC} \times V_{qe\_Line}) + (-I_{qe\_PCC} \times V_{de\_Line})] \quad (9)$$

$$I_{de\_Line} = \frac{2}{3} \times \frac{Q_{Line}}{V_{qe\_PLL}} \quad (10)$$

$Q_{Line}$ : Line Reactive Power [Var]

$I_{de\_Line}$ : Line Compensation Current [A]

$$I_{de\_refN} = I_{de\_ref} + (I_{de\_Cap} + I_{de\_Ex} + I_{de\_Line}) \quad (11)$$

식 (9)는 계산된 PCC 전류  $I_{PCC}$ 와 선로 전압  $V_{Line}$ 을 계산하여 선로 흡수 무효전력을 얻을 수 있으며, 식 (10)은 선로 발생 무효전력  $Q_{Line}$ 에 대해 발전원측 전류로 환산하기 위해  $V_{qe\_PLL}^r$ 로 나누어 전류로 계산한다 ( $V_{de\_PLL}$ 은 0으로 제어됨으로 식 (10)과 같이 간단하게 직렬 선로 보상전류를 계산할 수 있다). 식 (5)와 식 (10)을 통해 보상전류를 얻고, 식 (11)에서 인버터의 무효 전류를 제어하는 전류 레퍼런스  $I_{de\_ref}$ 에 보상전류를 더해 PCC의 무효전력을 제어하는 새로운 레퍼런스를 얻을 수 있다.

식을 통해 발전원의 출력 전압( $V_{PLL}$ )이 클수록 병렬 성분 보상전류가 증가하고, 선로에 흐르는 전류( $I_{PCC}$ )가 증가할수록 직렬성분 보상전류가 증가하게 되는 경향을 알 수 있어, 시스템의 특성이 결정되면 PCC 지점의 무효전력을 제어하기 위한 무효전류 크기를 예측할 수 있다.

그림 5는 PCC 전력을 0으로 제어하는 것을 가정한 전력 그래프이다. 인버터 측 필터 커패시터는 무효전력을 공급하고, 변압기 자화 성분과 송전선로는 무효전력을 흡수한다. PCC 지점의 무효전력은 병렬성분과 직렬성분이 발생시키는 무효전력 합으로 계산된다. 이를 계산하여 인버터에서 보상 때 PCC의 무효전력을 제어할 수 있게 되며, 인버터 출력을 보상전류로 제어할 때 PCC 무효전력을 원하는 값으로 제어할 수 있다( $Q_{Cap}$ : 필터 커패시터 발생 무효전력,  $Q_{Cap}$ : 변압기 여자성분 발생 무효전력,  $Q_{Line}$ : 송전선로 발생 무효전력).

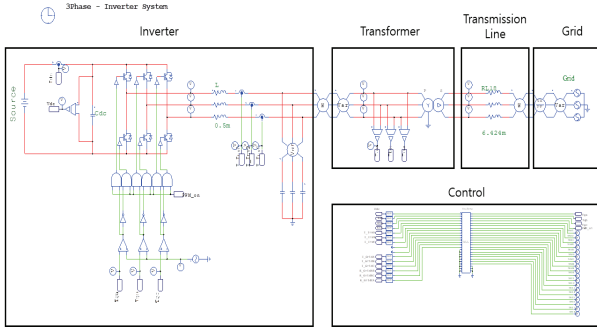


Fig. 6. PSIM distribution system simulation circuit.

### 3. 시뮬레이션

Low-Level Voltage 계통과 연계된 3[kVA] 용량의 발전원과, Extra-High Voltage 계통과 연계된 5[MVA] 용량의 발전원 시스템을 구성하였다. 그림 6은 배전 계통 시뮬레이션 회로도이며 인버터, 3상 Y-D 변압기, 가공선로, 계통, 제어부로 구성하였다. 저압 계통의 파라미터는 표 1과 같고, 배전 계통 파라미터는 표 2와 같다. 배전 선로 파라미터는 NPESI사의 선로 계산기를 사용하였으며<sup>[16]</sup>, 변압기 파라미터는 1.1pu 용량 여유분을 고려하여 계산하였다<sup>[17]</sup>.

저압 계통 시스템에서 제안하는 알고리즘을 적용하기 전과 후를 비교한 후, 알고리즘이 정상으로 동작하는 것을 확인하였다. 시스템 파라미터는 표 1과 같다.

그림 7은 1.5[s]를 기준으로 인버터에서 3[kW] 출력 시 알고리즘 적용 전과 후를 비교한 파형이다. 각 파형은 PLL 무효전력  $Q_{PLL}$ 이며, 병렬성분에 의해 발생하는 무효전력  $Q_{Parallel}$  ( $Q_{Parallel} = Q_{Cap} + Q_{EX}$ )과 직렬성분에 의해 발생하는 무효전력  $Q_{Series}$  ( $Q_{Series} = Q_{Line}$ ) 그리고 PCC 무효전력  $Q_{PCC}$ 이다. 1.5[s]를 기준으로 알고리즘이 적용되기 전  $Q_{PCC}$ 는 병렬성분과 직렬성분의 무효전력의 합으로 발생하게 된다.  $Q_{PLL}$ 에서 병렬성분과 직렬성분의 무효전력을 보상하여  $Q_{PCC}$ 가 '0'으로 제어되는 것을 확인할 수 있다.

그림 8은 그림 7과 같은 조건에서 Parallel 성분과 Series 성분의 보상 전과 후 PLL 및 PCC의 전압 및 전류를 확인한 파형이다. Parallel 성분에 의해 인버터 출력(PLL에 흐르는) 전류  $I_{\in v}$ 와  $I_{PCC}$ 의 크기 및 위상이 변화하며, Series 성분에 의해 인버터 출력(PLL에 걸리는) 전압  $V_{\in v}$ 와  $V_{PCC}$ 의 크기 및 위상이 변화한다. 그림 8(a)는 무효전력 보상 전 파형으로  $I_{\in v}$ 와  $V_{\in v}$ 이 동일 위상( $Q_{PCC} = 0$ )이지만,  $I_{PCC}$ 와  $V_{PCC}$ 의 위상이 일치하지 않는 것( $Q_{PCC} \neq 0$ )을 확인할 수 있다. 그림 8(b)는 보상을 통해  $I_{PCC}$ 와  $V_{PCC}$ 가 동일 위상( $Q_{PCC} = 0$ )인 것을 확인할 수 있어 파라미터의 정확한 정보를 알고 있다는 것을 가정하면 PCC의 무효전력을 정확히 제어할 수 있음을 확인하였다. 표 2를 통해 1[pu] 출력 시 발생하는 무효전력의 크기를 확인할 수 있다.

TABLE I  
LOW-VOLTAGE GRID SIMULATION SYSTEM  
PARAMETER

Parameter	Value
$S_{\in v}$ (Inverter rating power)	3 [kVA]
$L_{\in v}$ (Filter inductor)	3 [mH]
$C_{\in v}$ (Filter capacitor)	20 [uF]
$R_{line}, L_{Line}$ (Transmission line impedance)	0.1 [ $\Omega$ ], 3 [mH]
$E_{grid}$ (Grid voltage)	220 [V]
Switching frequency	8 [kHz]

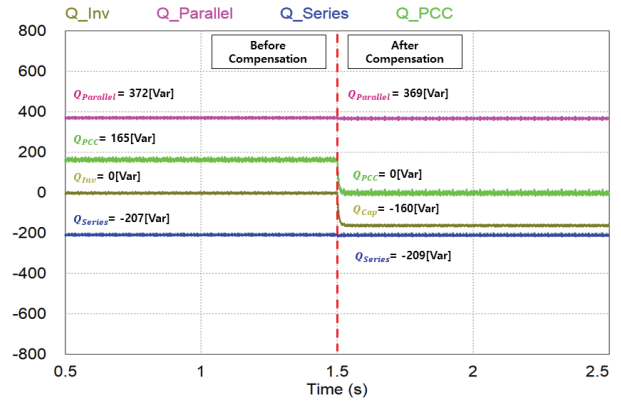
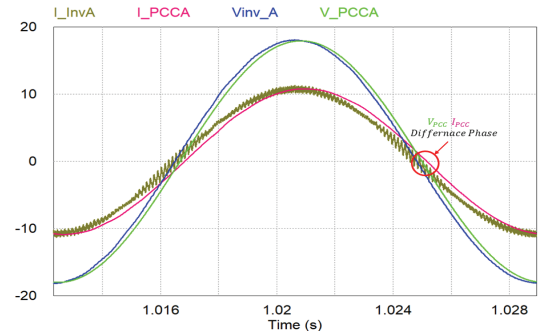
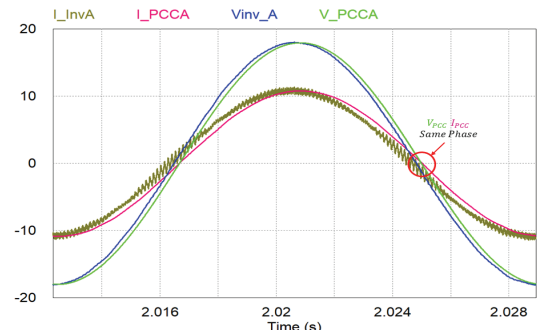


Fig. 7. Comparison of reactive power before and after the compensation for reactive power in a low voltage system.



(a) Voltage and Current waveform of PLL and PCC before applying the algorithm

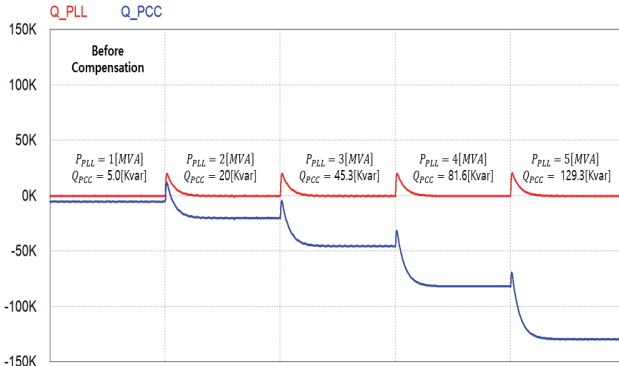


(b) Voltage and Current waveform of PLL and PCC after applying the algorithm

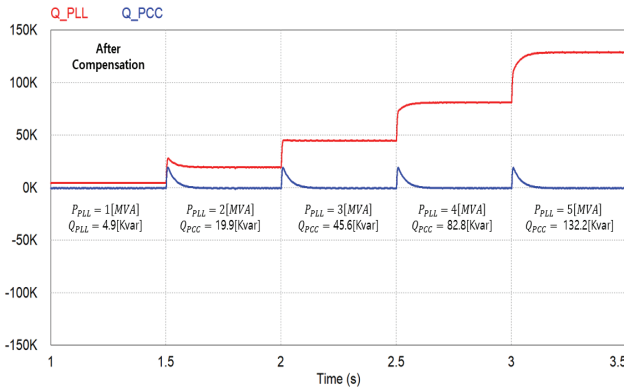
Fig. 8. Voltage and current comparison before and after the reactive power compensation in a low-voltage system.

TABLE II  
LOW-VOLTAGE GRID REACTIVE POWER ACCORDING  
TO THE ACTIVE POWER

Parameter	Value	Value [pu]
$P_{PLL}$	3 [kW]	1
$Q_{Parallel}$	372 [Var]	0.124
$Q_{Series}$	-207 [Var]	0.69
$Q_{PCC}$	165 [Var]	0.055



(a) Reactive Power waveform of PLL and PCC before applying the algorithm



(b) Voltage and Current waveform of PLL and PCC after applying the algorithm

Fig. 9. Comparison of reactive power before and after compensation in the distribution system.

그림 9는 배전 계통과 연계할 때 출력에 따른 무효전력의 변화를 확인하는 시뮬레이션 파형이다. 5[MVA] 용량 발전원이 0.5s 기준으로 0.2[pu] 단위로 증가하여 0.2[pu]부터 1[pu]까지 증가할 때 PLL과 PCC의 무효전력 변화를 시뮬레이션한 파형이다. 파라미터 정보는 표 3과 같다.

유효전력 출력 시 0.2[pu] 발생 무효전력이 4.8[kVar]으로 0.097%의 무효전력이 발생하지만, 유효전력 1[pu] 출력 시 발생 무효전력이 129.3[kVar]으로 2.5%의 무효전력이 발생함을 확인하였다. 표 4를 통해 출력량 대비 PCC에 발생하는 무효전력을 크기 및 Percent unit으로 확인할 수 있다.

TABLE III  
MIDDLE-VOLTAGE GRID SIMULATION SYSTEM  
PARAMETER

Parameter	Value
$S_{\in v}$ (Inverter rating power)	5 [MVA]
$L_{\in v}$ (Filter inductor)	0.5 [mH]
$C_{\in v}$ (Filter capacitor)	20 [uF]
$N$ (Y-D TR turn ratio)	380:22900
$R_e, X_e$ (Transformer serie impedance)	454 [ $\mu\Omega$ ], 7.22 [ $\mu\Omega$ ]
$R_e, X_m$ (Transformer parallel impedance)	4 [ $\Omega$ ], 4.9 [ $\Omega$ ]
$R_{line}, L_{line}$ (Transmission line impedance)	1.1832 [ $\Omega$ ], 6.424 [mH]
$E_{grid}$ (Grid voltage)	22.9 [kV]

TABLE IV  
THE AMOUNT OF COMPENSATION FOR REACTIVE  
POWER ACCORDING TO THE OUTPUT POWER OF  
THE POWER DISTRIBUTION SYSTEM

$P_{PLL}$ [pu]	$Q_{PCC}$ [pu]	$P_{PLL}$ [MW]	$Q_{PCC}$ [kVar]
0.2	0.00097	1.0	4.8
0.4	0.00394	2.0	19.7
0.6	0.00901	3.0	45.0
0.8	0.01626	4.0	81.2
1.0	0.02580	5.0	129.0

그림 10은 선로 거리 및 유효전력 출력 전력에 따른 PCC의 무효전력 변동 추이를 나타낸 그래프이다. 선로 길이가 16[km]일 때 5[MW](1.pu) 출력 시 최대 0.052 [pu]에 해당하는 무효전력이 발생하는 것을 확인할 수 있다.

Low-Voltage 계통과 연계된 3[kVA] 용량의 발전원과, Extra-High Voltage 계통과 연계된 5[kVA] 용량의 발전원을 바탕으로 제안하는 알고리즘을 적용하여 시뮬레이션한 결과, 무효전력을 발생시키는 파라미터 정보를 통해 PCC의 무효전력을 정확히 제어할 수 있으며, 제어가 정확히 이루어지는 것을 PCC의 전압 전류 위상을 통해 확인하였고, 시스템 특성(선로 길이)에 따른 발생 무효전력량 크기를 수치로 확인하였다.

#### 4. 실험

제안하는 PCC 무효전력 제어 알고리즘을 위한 실험 장비 구성은 그림 11과 같다. DSP28335를 통해 구현한 3상 인버터, LC 필터, 변압기, 선로 임피던스를 모의하기 위한 인덕터, 계통을 모의하기 위한 NF Power Source로 구성된다. 3[kW] 저압 계통연계 상황을 모의하였으며, 파라미터는 표 1과 같은 파라미터를 적용하였다.



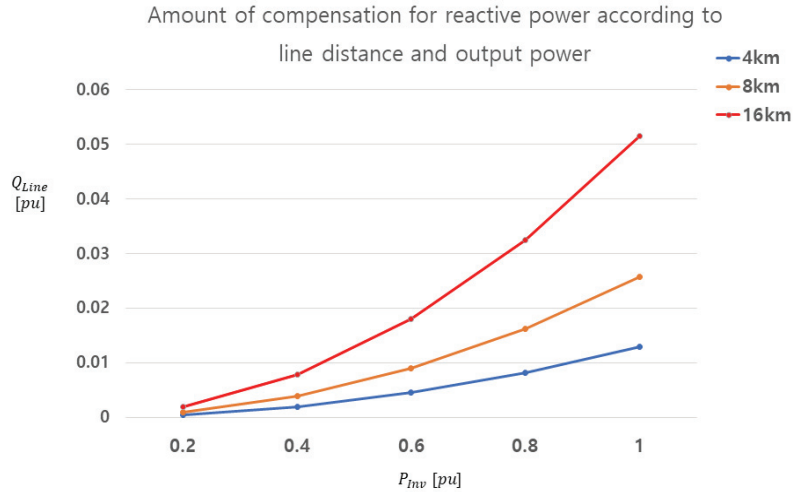


Fig. 10. Amount of compensation for reactive power according to track distance and output power.

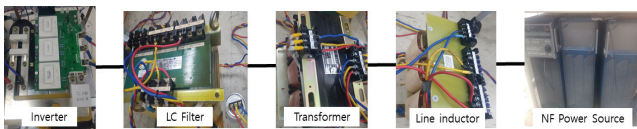


Fig. 11. Composition of experimental equipment set.

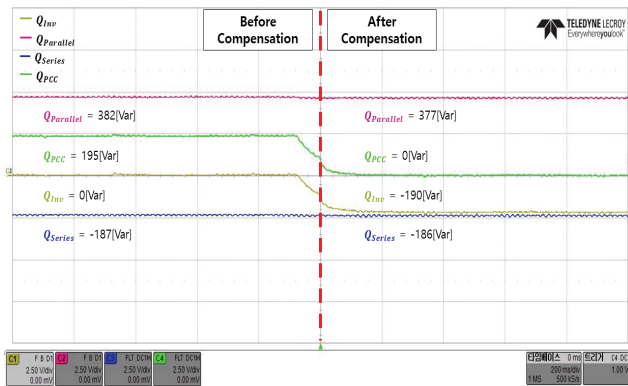
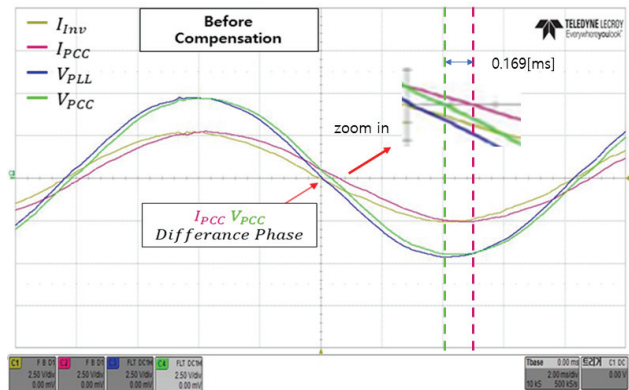


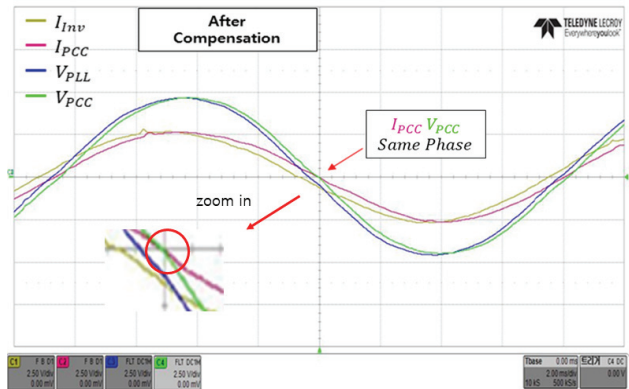
Fig. 12. The waveform of the reactive power before and after the reactive power compensation was applied.

그림 12는  $P_{ref}^* = 3[kW]$ ,  $Q_{ref}^* = 0[Var]$  지령 시 발생하는 무효전력 파형이다. 각 파형은 인버터 출력 무효전력 ( $Q_{Inv}$ ), 필터 커패시터 발생 무효전력( $Q_{Cap}$ ), 변압기 자화 무효전력( $Q_{Ex}$ ), PCC 무효전력( $Q_{PCC}$ )이다. 무효전력 보상 전 PCC에는 병렬성분 및 직렬성분 임피던스에 의해 발생한 무효전력이 합쳐진 무효전력이 PCC에 발생하며, 이를 보상할 때  $Q_{PCC}$ 가 0으로 수렴하는 것을 확인할 수 있다.

그림 13은 PLL 전압  $V_{PLL}$ , 전류  $I_{Inv}$  및 PCC 전압  $V_{PCC}$ , 전류  $I_{PCC}$ 를 확인한 파형이다. 그림 13(a)는 무효전력 보상 전 파형으로 인버터 출력단 전압  $V_{PLL}$  과 출력 전류  $I_{Inv}$  는 동일 위상이지만, 병렬성분 및 직렬성분 임피던스에 의해  $I_{PCC}$ 와  $V_{PCC}$ 에 위상 차이가 발생하는 것을 확인



(a) Voltage and Current waveform of PLL and PCC before applying the algorithm



(b) Voltage and Current waveform of PLL and PCC After applying the algorithm

Fig. 13. Voltage and current waveform of before and after application of reactive power compensation.

할 수 있다( $0.169[ms] = 0.101\%$  위상차 발생). 그림 13(b)는 무효전력을 보상하여  $I_{PCC}$ 와  $V_{PCC}$ 가 동일 위상임을 확인할 수 있으며, 알고리즘이 정확히 동작하는 것을 확인할 수 있다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 발전원과 계통 사이에 발생하는 임피던스 및 무효전력에 대해 설명하고, 분산전원이 계통에 연계될 때 출력 전력, 발전원 전압 및 임피던스 정보를 통해 PCC 무효전력을 제어하는 알고리즘을 제안하였고, 추가 발전원이나 수동소자의 삽입 없이 알고리즘이 사용 가능하다는 점을 주장한다.

발전원에서 유효전력 1[pu]을 출력하고, 8km 선로를 기준으로 Low-Voltage 계통과 연계된 3[kVA] 용량의 발전원 PCC에서 0.055[pu]의 무효전력이 발생하였고, Extra-High Voltage 계통과 연계된 5[kVA] 용량의 발전원 실험에서 0.026[pu]의 무효전력이 발생한 것을 확인하였다. 알고리즘을 적용하여 PCC의 무효전력을 '0'으로 제어하였고, 리플 성분을 제외하면 오차 없이 보상됨을 확인하였다. 또한, 알고리즘 적용 전과 후를 인버터 출력 전압, 전류와 PCC의 전압, 전류 위상을 비교하여 알고리즘의 정확성을 검증하였다.

본 논문은 필터 용량, 변압기 여자전류 측정 및 선로 길이를 통해 임피던스를 계산하여 알고리즘을 적용하였다. 향후, 계통 임피던스를 추정하는 기법을 사용한다면 실시간으로 변화하는 임피던스에 대해 정확한 보상이 가능할 것이라고 기대한다.

이 논문은 2021년도 광운대학교 우수연구자 지원 사업, 산업통상자원부(MOTIE), 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (No. 20193710100061)

## References

- [1] G. Yan, Y. Cai, Q. Jia, Y. Li, and S. Liang, "Stability analysis and operation control of photovoltaic generation system connected to weak grid," in *IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*, pp. 1 - 6, 2017.
- [2] S. Sang, N. Gao, X. Cai, and R. Li, "A novel power-voltage control strategy for the gridtied inverter to raise the rated power injection level in a weak grid," *IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron.*, Vol. 6 pp. 219 - 232, 2018.
- [3] W. Cheng, "Nonlinear behavior and analysis of three-phase grid-connected power converters [D]," *Huazhong University of Science and Technology*, 2014.
- [4] H. Alenius, R. Luhtala, T. Messo, and T. Roinila "Autonomous reactive power support for smart photovoltaic inverter based on real-time grid-impedance measurements of a weak grid," *Electric Power System Research*, Vol. 182, pp. 1 - 3, 2020.
- [5] J. A. Suul and M. Molinas, "Properties of reactive current injection by AC power electronic systems for loss minimization," in *2012 15th International Power Electronics and Motion Control Conference*, pp. 1 - 8, 2012.
- [6] A. Spring, G. Wirth, G. Becker, R. Pardatscher, and R. Witzmann, "Grid influences from reactive power flow of photovoltaic inverters with a power factor specification of one," *IEEE Trans. Smart Grid*, Vol. 7, pp. 1222 - 1229, 2016.
- [7] M. Molinas, D. Moltoni, G. Fascendini, J. A. Suul, R. Faranda, and T. Undeland, "Investigation on the role of power electronic controlled constant power loads for voltage support in distributed AC systems," in *2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference*, pp. 3597 - 3602, 2018.
- [8] X. Wang, D. Yang, and F. Blaabjerg, "Harmonic current control for LCL-filtered VSCs connected to ultra-weak grids," in *2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp. 1608 - 1614, 2017.
- [9] G. Yan, Y. Cai, Q. Jia, Y. Li, and S. Liang, "Stability analysis and operation control of energy internet and energy system photovoltaic generation system connected to weak grid," in *2017 IEEE Conference on Energy System Integration (EI2)*, pp. 1 - 6, 2017.
- [10] A. Canrera-Tobar and E. Bullich, "Review of advanced grid requirements for the integration of large scale photovoltaic power plants in the transmission system," in *Proceedings of the Science Direct, Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 62, pp. 981 - 982, 2016.
- [11] Y. Ren and Z. Piao, "Effect of parallel compensation on series compensation in long distance distribution line," in *International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology*, pp. 2139 - 2140, 2011.
- [12] U. Karki, D. Gunasekaran, and F. Z. Peng, "Reactive compensation of overhead AC transmission lines using underground power cable," in *2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, pp. 1 - 3, 2015.
- [13] S. A. Qureshi and Z. Hameed, "Reactive power compensation in solar power plants using FACTS devices," in *2016 Eighteenth International Middle East Power Systems Conference*, pp. 474 - 479, 2016.
- [14] D. P. Kadam and B. E. Kushare, "Reactive power improvement in wind park system using FACTS," in *2013 International Conference on Power, Energy and Control (ICPEC)*, pp. 366 - 370, 2013.
- [15] Z. Chen, J. M. Guerrero, and F. Blaabjerg, "A review of the state of the art of power electronics for wind turbines," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 24, pp. 1859 - 1875, 2009.

[16] NEPSI, "Medium voltage shielded cable parameter calculator," [online]. Available: <https://www.nepsi.com/resources/calculators/calculation-of-cable-data.htm>.

[17] S. G. Jeong, "Electric machine," *Haksan Media*, pp. 76 - 78, 2017.



**송승호(宋丞鎬)**

1968년 8월 27일생. 1991년 서울대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년~1995년 (주)포스콘 기술연구소 연구원. 1999년 동 대학원 전기공학부 졸업(공학박). 2000년~2006년 전북대 전자정보공학부 조교수. 2006년~현재 광운대 전기공학과 교수. 당 학회 편집위원장.



**허철영(許哲榮)**

1995년 4월 20일생. 2019년 광운대 전기공학과 졸업. 2022년~현재 동 대학원 전기공학과 졸업(석사).



**김용래(金容來)**

1992년 8월 22일생. 2017년 안양대 전기전자공학과 졸업. 2019년 광운대 전기공학과 졸업(석사). 2021년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.