

태양광발전 저압연계시 인버터 출력단 전압상승에 대한 연구

조강연¹, 어익수^{2*}

¹한국전기안전공사, ²호남대학교 전기공학과

A study on the voltage rise of the inverter output terminal according to the low voltage Grid connection of solar power generation

Kang-yeon Cho¹, Ik-soo Eo^{2*}

¹Korea Electrical Safety Corporation

²Dept. of Electrical Engineering, Honam University

요약 환경문제가 세계적으로 심각하게 다뤄지면서 우리나라도 태양광발전 설비가 급속도로 증가하였다. 특히 소용량 태양광발전을 저압배전으로 연계하는 계통에서 인버터 출력단의 전압상승으로 인하여 저압배전계통 품질저하 및 부하설비에 악영향을 주고 있다. 또한 과전압에 의한 인버터 가동중지로 인하여 발전소의 경제적 손실을 줄 수 있다. 본 논문에서는 저압배전계통 연계에 따른 태양광 인버터 출력단 전압 상승 해결방안을 연구 하였다. 첫째, 역률제어 및 능동전압제어 인버터를 사용하여 무효전력을 제어하면 출력단 전압이 230.91V에서 208.99V로 단자전압 비율이 약 10%가 내려갔다. 둘째, 배전전압용 변압기 2차 Tap을 조정하면 약 15V의 전압조정이 가능하지만, 한전배전규정전압이 $220 \pm 13V$ 의 범위가 벗어나지 않는 한 Tap을 조정해 주지 않는 문제점이 있다. 셋째, 인버터의 댓 수를 제한하면 인버터 과전압 범위 안에서 인버터를 기동할 수 있다. 넷째, 단상이 아닌 삼상으로 연계하면 전압이 분배되어 전압상승을 방지 할 수 있다. 4가지 중 현장 적용이 용이한 것은 역률제어 및 능동전압제어 인버터를 사용하는 것임을 확인하였다.

Abstract As environmental issues have been taken seriously, the number of solar power generation facilities has rapidly increased in Korea. The voltage at the output stage of an inverter increases in a system that connects a small-capacity photovoltaic power generation to low-voltage power distribution. This degrades the quality of the low-voltage distribution system and adversely affects the load facility. In this study, a solution was obtained to increase the voltage at the output stage of the solar inverter according to the connection of the low-voltage distribution system. The voltage can be controlled by using reactive power factor control inverters. If the secondary tap is adjusted, the voltage can be adjusted to about 15 V, but there is a problem in that the tap is not adjusted unless the KEPCO distribution regulation voltage is out of the range of $220 \pm 13V$. If the number of inverters is limited, the inverter can be started within the inverter overvoltage range. If it is connected to three phases, the voltage is distributed. The results indicated that power factor control and active voltage control inverters were easy to apply in the field.

Keywords : Photovoltaic Power Generation, Low-voltage Distribution System, Overvoltage, Active Voltage Control, Power Factor Control.

*Corresponding Author : Ik-soo Eo(Honam University)

email: iseo@honam.ac.kr

Received October 21, 2020

Accepted November 6, 2020

Revised November 5, 2020

Published November 30, 2020

1. 서론

현대사회는 지구 온난화 및 온실가스 등 환경 문제가 세계적으로 심각하게 다뤄지면서, 이런 문제를 해결하기 위하여 정부는 신재생에너지 정책을 발표하여 2040년까지 30~40%로 태양광발전 및 풍력발전 중심으로 달성하겠다는 목표를 제시했다. 따라서 향후 우리나라도 태양광발전 및 풍력발전이 급속도로 증가될 전망이다. 이러한 신재생에너지발전은 분산형전원(DG : Distributed Generator) 형태로 전력시장거래, 전력수급계약(PPA: Power Purchase Agreement), 요금상계거래(Net Metering) 제도를 이용하여 기존 전력망과 연계하여 전력에너지를 전송하며, 우리나라 배전선로의 경우 태양광발전 연계가 대부분을 차지한다. 과거의 배전계통은 전원측에서 부하로만 전력이 흐르는 단방향 조류를 사용하고 있으므로 전압강하에 의한 저전압 문제에 대해서만 고려하였지만, 현재의 배전계통은 분산형전원에 의한 양방향 조류로 전압상승, 고조파 등을 고려해야만 한다. 특히 가정에 설치되고 있는 소 용량 태양광 발전시스템 증가로 인하여 저압배전으로 연계되는 계통에서 태양광 인버터 출력단의 전압이 상승하는 문제가 발생하고 있다. 이는 저압배전계통의 전원품질 뿐만 아니라 이를 사용하고 있는 부하설비에 악영향을 줄 수 있다. 또한 태양광 인버터 정지에 따른 고객의 경제적 손실에도 영향을 줄 수 있다. 따라서 본 논문에서는 태양광 인버터 기동 시 출력단 전압 상승 해결방안에 대하여 연구한다.

2. 계통의 구성

2.1 저압계통 연계형 태양광발전 시스템 구성

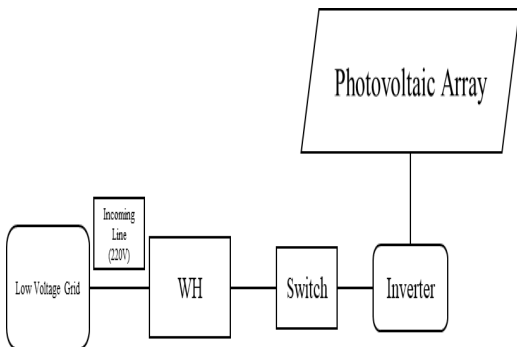


Fig. 1. Construction of residential solar power system

저압계통 연계형 태양광발전설비는 Fig. 1과 같이 주택 등에 설치하고, 전기사업자의 저압전로와 연계한 태양전지 출력이 20kW 이하의 것을 말한다. 그 방법으로는 태양전지 어레이를 통하여 생산되는 직류 전력을 인버터에서 교류 전력으로 변환하여 저압계통으로 연계하는 시스템이다.

2.2 인버터 구성

인버터는 태양전지 어레이로 발전된 직류전력을 교류전력으로 변환하는 인버터, 발전전력 등의 감시기능과 계통연계 보호계전기 등의 보호기능 등이 일체화된 장치이다. 단상인버터의 기본구성과 제어원리로는 Fig. 2와 같다.

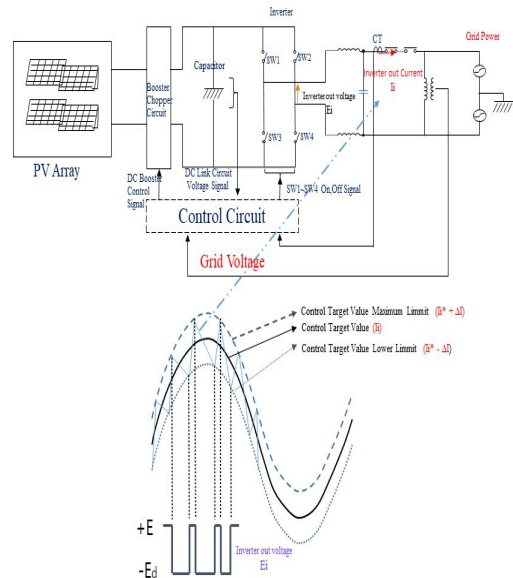


Fig. 2. Basic configuration and control principle of single-phase inverter

계통전압과 동상인 인버터 출력전류의 제어목표치인 I_i^* (순시치)를 조정하여, 그에 대해 제어 목표 상한치 ($I_i^* + \Delta I$), 제어 목표 하한치($I_i^* - \Delta I$)를 정하고, 인버터 출력전류 I_i 가 하한치에 달하면 인버터 스위치 SW 1·4를 On, SW 2·3을 Off로 하여 인버터의 출력전류를 증가시킨다. 이 전류가 상한치에 달하면 인버터의 스위치 SW 1·4를 Off, SW 2·3을 On으로 하여 인버터의 출력전류를 감소시킨다. 이처럼 하여 인버터 출력전류의 순시치가 제어목표치의 상·하한치 내에 안정화되도록 제어된다. 승압초퍼(Boost Chopper)회로로 태양전지 어레이의 전압을 승압시켜 인버터 직류링크회로에 입력함과 동시에 태

양전지 어레이의 전압을 바꾸어 MPPT(Maximum Power Point Tracking)제어를 한다[1].

2.3 계통송전의 원리

태양광 인버터를 통해 배전계통에 송전한다는 것은 전원을 반대로 특별고압 계통에 전기를 흘려보낸다는 것이다. 우리가 사용하는 교류는 0V를 기준으로 +전압과 -전압이 60Hz를 번갈아 가며 발생한다. 그 값은 실효치(RMS: Root Means Square)의 값을 가지고 있다. 즉 삼상교류인 경우 Fig. 3과 같이 $380V \times 1.414 = 537V$ 의 파형을 가진다.

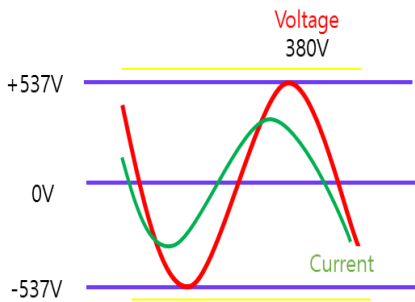


Fig. 3. Sine wave of voltage and current

이러한 계통의 전압에 전원을 송전하기 위해서는 이 전위보다 높아야 한다. 따라서 이 전압의 피크 값보다 직류 전압이 높아야 태양광에서 발생한 직류 전원을 교류로 만들어 송전할 수 있다. 이러한 직류를 교류로 만드는 기술을 펄스폭변조 즉 PWM(Pulse Width Modulation)이며, 직류를 잘게 잘라 필터링을 거쳐 교류를 만드는 것이다. 이때 태양광인버터는 전류형 제어모드 동작이다. 전압은 계통에서 만들어 지므로 인버터는 전류만을 제어한

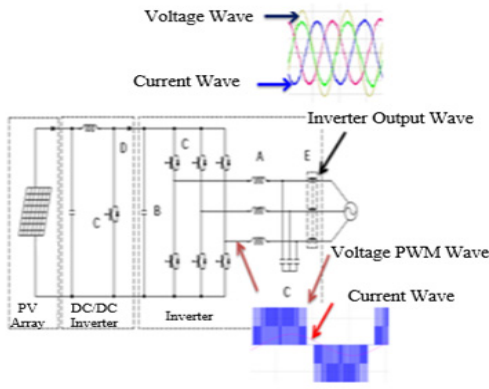


Fig. 4. Principle of solar inverter power transmission

다. PWM을 하는 이유도 전압의 파형은 계통에 의지하므로 전류의 파형을 교류로 만들기 위해서 PWM을 한다. 또 중요한 사항은 계통으로 전원을 송전하기 위해서는 계통의 위상과 맞추어 전류를 보낸다.

Fig. 4의 원리를 설명하면 다음과 같다.

- 1) 인버터가 계통으로 전기를 송전하기 전에 “E”는 MC(Magnet Contactor)로 개방한다. 태양이 떠오르면 태양전지의 전압이 올라가 인버터는 제어 전원이 켜지고 계통의 전압을 확인한다.
- 2) 이때 태양광에서 발전된 전기가 계통 쪽으로 흘러가기 위해서는 어느 정도의 전압 이상이 되어야 하는데 단상 220Vac인 경우 직류링크전압이 350Vdc가 되면 인버터는 계통의 전압을 확인하고 위상을 확인한 뒤 전원을 송전할 준비를 한다.
- 3) 350Vdc이상의 직류전원 및 한전계통에 이상이 없으면 계통연계 기술기준 5분의 시간이 지나면 인버터는 계통으로 송전할 수 있는 전원을 만들기 위하여 직류/직류 Converter(Boost: 승압회로)를 동작시켜 직류링크전압을 상승시킨다.
- 4) 계통이 3상 380Vac일 때는 “B”인 커패시터 전압을 600Vdc 이상으로 만든다. 이렇게 하면 전압이 반대로 인버터 쪽으로 들어오지 못한다. 즉, 교류계통전압의 피크치가 537Vac이므로 이 전압 보다 높게 만든다.
- 5) 220Vac인 경우 직류링크전압이 높아지면 인버터는 MC를 붙이고 계통으로 송전을 시작한다. 일단 직류전압이 350Vdc가 되어 계통으로 송전이 시작되면 인버터의 정지전압이 될 때 까지 계속 송전을 한다.
- 6) 삼상 380Vac인 경우 직류링크전압이 620Vdc 이상 유지되면 인버터는 MC를 붙이고 계통으로 송전을 시작한다. 일단 직류전압이 620Vdc가 되어 계통으로의 송전이 시작되면 태양전지전압이 인버터의 정지전압이 될 때 까지 계속 송전을 한다.
- 7) 태양이 저서 발전이 되지 않는 전압이 되면 인버터는 MC를 끊고 계통의 전류가 거꾸로 들어오는 못하도록 한다. 더 떨어지면 제어전원까지 꺼져서 Full off상태로 된다[2].

3. 인버터 Data 분석

태양광 발전용량이 14kW이고 용량 3.7kW인 인버터

4대를 이용하여 주택용 PPA(Purchase Power Agreement)인 단상 220V의 저압계통에 연계를 하는 태양광 발전시스템을 분석한다.



Fig. 5. Solar inverter's place

인버터를 기동하지 않을 때 출력단 전압은 약 231V이다. 인버터 1대를 On하였을 때의 측정전압은 약 2.5V가 상승한 233.5V가 측정되었고, 인버터 2대를 On하였을 때의 측정전압은 약 2.5V가 상승한 236V가 측정되었다.



Fig. 6. Voltage after Inverter 3 on

인버터 3대를 On하였을 때의 전압측정은 Fig. 6과 같이 약 2.5V가 상승한 239.6V로 측정되었다. 인버터 4대를 On하자 인버터의 과전압 범위를 벗어나 인버터가 정지하였다. (인버터 과전압 범위 : 220±22)

4. 분석결과

4.1 역률제어 및 능동전압제어 인버터 사용

무효전력을 제어하면 전압을 제어할 수 있다. 분산형 전원 종류 중 태양광발전의 유효 및 무효전력 출력 변동에 의한 계통의 전압변동은 Fig. 7과 식 1로 표현될 수 있다[3]. 즉, 식1과 같이 부하전력 및 발전전력에 따라 계통의 전압이 변동된다.

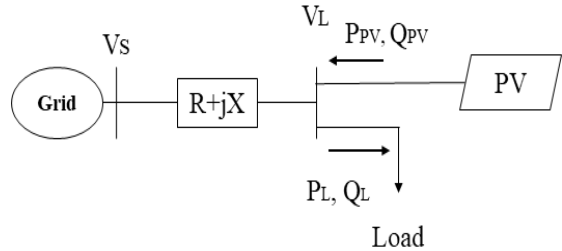


Fig. 7. Power flow according to the connection of solar power low voltage distribution system

$$\Delta V = V_s - V_l = \frac{R(P_l - P_{pv}) + X(Q_l \pm Q_{pv})}{V_l} \quad [식1]$$

여기서, Ppv, Qpv : 태양광발전의 출력, PL, QL : 부하의 소비전력

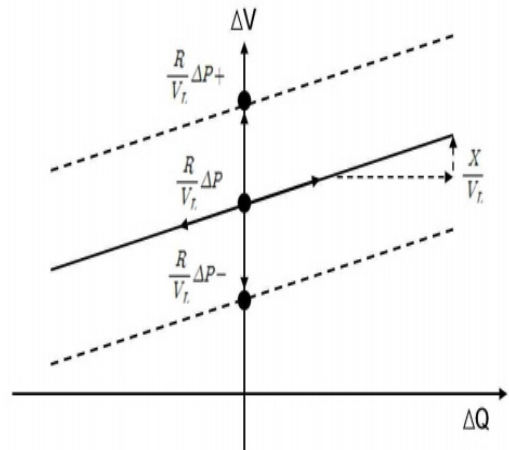


Fig. 8. Relationship between Active and Reactive Power of the System and Voltage Fluctuation

만약 $\Delta P = P_L - P_{PV}$, $\Delta Q = Q_L \pm Q_{PV}$ 라 하면 Fig. 8과 같이 계통의 전압은 무효전력 $\Delta Q = Q_L \pm Q_{PV}$ 의 크기에 따라 결정되므로 결국 분산형전원의 무효전력(QPV)으로 전압제어가 가능하다. 여기서 ΔV 의 변화량은 기울기인 X/V_L 에만 영향을 받는다.

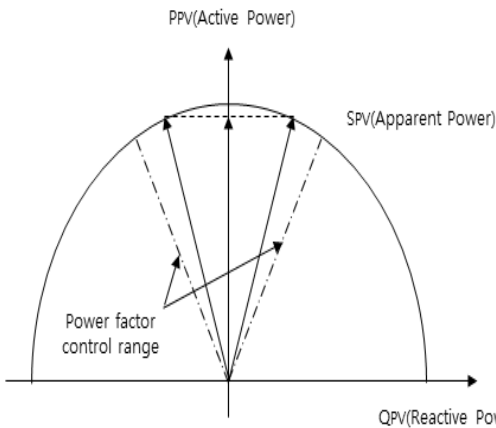


Fig. 9. Concept map of distributed power factor control range

또한 분산형전원의 무효전력 제어범위는 분산형전원의 정격출력과 역률에 의해서 그 제어범위가 제한되며, 그 개념은 Fig. 9와 같다[5]. 태양광발전 피상전력(SPV)이 유효전력(PPV)보다 클 때 태양광발전 시스템의 인버터는 무효전력(QPV)을 계통에 공급하거나 소모할 수 있다. 인버터는 수 Cycle 수준의 시간에 무효전력을 공급 또는 소모함으로써 빠른 전압변동에 대응이 가능하다. 태양광 패널의 출력 유효전력(PPV)이 태양광발전의 용량(SPV)에 근접할수록 무효전력(QPV)의 제어 범위가 거의 제로에 가깝게 된다[3,4,5]. 무효전력(QPV)의 크기는 식 2와 같다.

$$Q_{pv} = \sqrt{S_{pv} - P_{pv}} \text{ (kVA)} \quad [식2]$$

Fig. 10은 저압계통의 분산형전원 종합운영시스템에 대한 개념도이다.

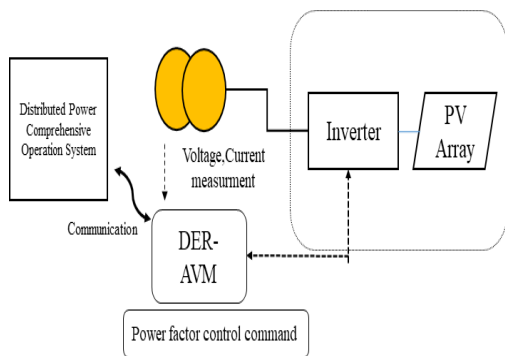


Fig. 10. Conceptual diagram of low-voltage distributed power supply integrated operation system

DER-AVM(Distributed Energy Resource Active Voltage Manager : 분산형전원 종합운영시스템)은 분산형전원과 기존 계통과 연계점의 전압을 규정 전압 이내로 유지하기 위해 연계점의 전압을 모니터링하고 태양광발전시스템의 인버터 역률을 제어한다. 즉, 기준 값 보다 낮으면 연계 점의 전압을 상승시키기 위해 진상운전을 하고 기준 값 보다 높으면 연계점의 전압을 낮추기 위해 지상운전을 지령한다. 이때 역률 운전범위는 1~0.9사이 이다[6]. Table. 1은 단상 220V 용량 3.7kW의 역률 제어 인버터 단자전압 실제 측정값이다.

Table 1. Terminal voltage measurement value of Power factor control inverter

Rated active power output (Pn:3.7kW)		Terminal voltage (Vn):220V				
Effective output (%)	Terminal voltage ratio (V/Vn)	Rated active power (kW)	Rated effective output voltage (V)	Rated reactive power (kVar)	Expected reactive power (kVar)	Error (%)
100	1.05	3.68	230.91	-1.78	-1.78	0.00
	1.03	3.69	226.82	-1.21	-1.78	0.00
	1.01	3.70	222.29	0.03	0.00	0.81
	1.00	3.69	220.23	0.03	0.00	0.81
	0.99	3.69	217.73	0.03	0.00	0.81
	0.97	3.69	213.42	1.20	1.21	-0.27
	0.95	3.67	208.99	1.77	1.78	-0.27

4.2 배전용 변압기 Tap 조정

배전용 변압기 Tap을 조정 하여 2차 전압을 낮추는 방법이다. 변압기 Tap은 1탭마다 약 15V의 전압을 조정할 수 있다. 태양광발전용량 14kW이고 인버터용량 3.7kW인 장소에서의 인버터 Off상태의 저압계통전압은 약 231V로 측정되었다. 이는 한전배전규정전압인 220±13V의 범위를 벗어나지 않기 때문에 한전에서 변압기 Tap을 조정하지 않고 수용가에 자동전압조정기를 설치하라고 권고하는데 이는 경제적, 설치적 문제들이 있다. 따라서 변압기 Tap을 조정하는 것은 어려움이 있다.

4.3 인버터 댓 수 제한

인버터 Data 분석에서와 같이 인버터를 4대 On하였을 때 인버터 출력단 전압이 더욱 더 상승하였다. 따라서 인버터의 댓 수를 제한하여 배전계통 전압을 낮추는 것이다. 하지만 이는 발전용량 제한의 문제가 되므로 현실적 대안은 될 수 없다.

4.4 삼상으로 저압계통 연계

단상으로 여러 대의 인버터를 저압계통에 연계할 경우 인버터 기동에 따른 전압상승이 각 상으로 분배되어 한 상에 전압이 누적되어 상승하는 것을 방지할 수 있다. 하지만 이는 삼상을 사용하는 수용가에서만 태양광발전 연계가 가능하다. 따라서 단상으로만 사용하여 태양광발전을 하는 수용가 측에서는 삼상으로 저압계통에 연계하기는 어렵다.

5. 결론

본 논문에서는 저압계통으로 연계되는 인버터 출력 단 전압상승에 대한 해결방안을 4가지방법으로 연구하였다. 첫째로 역률제어 인버터 사용이다. Table. 1과 같이 무효전력을 제어 하지 않는 인버터 출력 단 전압은 약 230.91V가 측정되었다. 하지만 무효전력을 제어하였을 경우 전압은 약 208.99V로 단자전압 비율이 약 10%가 내려갔다. 둘째로 변압기 Tap을 조정하는 것이다. 변압기 Tap을 조정하면 약 15V의 전압조정이 가능하다. 하지만 한전배전규정전압인 $220 \pm 13V$ 의 범위가 벗어나지 않는 한 한전 측에서는 Tap을 조정해 주지는 않는 문제점이 있다. 셋째로 탭 수를 제한하는 것이다. 예를 들어 15kW의 발전용량을 얻기 위해서는 단상인버터 3.7kW 5대를 설치해야 한다. 하지만 출력단 전압 상승이 발생하므로 추천하지 않는 방법이다. 넷째로 삼상으로 연계하는 것이다. 3상4선식을 사용하는 수용가에서는 삼상용 인버터 사용이 가능하고 단상인버터를 사용할 때 단상 전압이 분배되어 태양광발전 연계가 가능하지만 단상으로만 연계하는 수용가에서는 출력 단 전압상승을 해결 할 수 없다. 태양광발전의 저압연계에 따른 인버터 출력 단 전압상승의 가장 현실적으로 적합한 방법으로는 역률제어 또는 능동전압제어 인버터를 사용하는 것이다. 현재 한전에서는 DER-AVM 연계형 인버터인 경우 500kW 이상에서만 적용하고, 500kW 미만의 경우에는 DER-AVM을 필요로 하지 않는다. 이와 같은 이유로 본 논문에서 시험한 데이터와 같이 현재 현장에서 사용되고 있는 소용량의 태양광 인버터들은 역률제어 및 능동전압제어가 되지 않는 것을 확인하였다. 향후 저압계통으로 연계되는 소용량 태양광발전시스템은 더욱 더 증가할 것이다. 인버터의 출력단에 발생하는 전압상승은 저압계통의 전원품질을 저하시켜 부하설비에 영향을 줄 뿐만 아니라 수용가에도 경제적 피해를 줄 수 있다. 따라서 소용량의 인버

터들도 역률제어 또는 능동전압제어 가 가능한 인버터의 사용 개선이 필요하다.

References

- [1] Written by Guy Takaaki, Seong-dong Kim, Translated by Young-jin Kim, p202, Seong an dang, 2017, pp.44-45
- [2] Damsong, Everything moves relatively, Available From: <https://blog.naver.com/sipeng/10153829460> (accessed Oct. 04, 2020)
- [3] Yashodhan P. Agalgaonkar, Bikash C. Pal & Rabih A. Jabr. (2014 January). Distribution Voltage Control Considering the Impact of PV Generation on Tap Changers and Autonomous Regulators. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 29, No. 1. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2013.2279721>
- [4] Jae-Geun Jeon, Dong-Jun won, Tae-Hyun Kim, *Voltage control of ULTC and Distributed Generations in Distribution system*, Master's thesis, Journal of the Korean Institute of Electrical Engineers, pp.2206-2207, 2011.
- [5] Konstantin Turitsyn, Petr Sulc, Scott Backhaus & Michael Chertkov. (2010). Distributed Control of Reactive Power Flow in a Radial Distribution Circuit with High Photovoltaic Penetration. DOI: <https://doi.org/10.1109/PES.2010.5589663>
- [6] Tae-Hyun Kim, *A Study on Voltage Regulation Method in Distribution System with Photovoltaic Generations*, Master's thdsis, Seoul University Graduate school, pp29-30, 2019.

조 강 연(Kang-yeon Cho)

[정회원]



- 2002년 2월 : 목포대학교 전기공학과 졸업
- 2019년 3월 ~ 현재 : 호남대학교 대학원 재학 중
- 2007년 3월 ~ 현재 : 한국전기안전공사 검사부 근무

<관심분야>

전기설비, 신재생에너지, 전기설계 및 진단

어 익 수(Ik-soo Eo)

[종신회원]



- 1996년 2월 : 한양대학교 대학원
전기공학과 (석사)
- 2008년 2월 : 서울벤처대학원 컴
퓨터응용학과 (박사)
- 1998년 2월 ~ 현재 : 호남대학교
전기공학과 교수

〈관심분야〉

전기설비 및 조명분야