

대용량 태양광전원이 연계된 배전계통의 전압안정화를 위한 소수력발전기의 최적전압제어 알고리즘

Optimal Voltage Control Algorithm of Small Hydro Generators for Voltage Stabilization in Distribution system with large scaled PV systems

최 흥 열* · 최 성 식* · 강 민 관* · 노 대 석*
(Hong-Yeol Choi · Sung-Sik Choi · Min-Kwan Kang · Dae-Seok Rho)

Abstract - According to the government's policy to demonstrate and expand the renewable energy sources, distributed generators such as PV and WP are installed and operated in distribution systems. However, there are many issues related to power quality problems including over voltage and under voltage of customers. In order to overcome these problems, the electric power company have installed a step voltage regulator (SVR) in primary feeders interconnected with distributed generators, and also have established the technical guidelines for the distributed generators to stabilize the customer voltages in distribution systems. However, it is difficult to maintain the customer voltages within allowable limit. Therefore, this paper reviews the problems of voltage control by SVR in a distribution systems interconnected with a large amount of PV systems, and proposes characteristics of operating range and voltage control limit of the small hydropower generators. Also, with the estimation of the influence to the power system voltages from the voltage control mode of generators, this paper proposes the optimal voltage control algorithm of the small hydropower generators. By programming the proposed algorithm into control simulator of exciter, it is confirmed that the proposed algorithm can contribute the voltage stabilization in distribution systems interconnected with large scaled PV systems.

Key Words : Small hydropower plant, Optimal voltage control, Voltage stabilization, Reactive power, SVR

1. 서 론

최근 정부에서는 차세대 성장 동력 산업의 하나로서 녹색성장 정책을 추진하여, 2030년까지 신재생 에너지전원의 비중을 전체 에너지전원의 11% 정도로 확대하는 보급 사업을 적극적으로 수행하고 있다. 이러한 신재생에너지 전원의 활성화 방안에 따라 지자체와 신재생 에너지 발전사업자를 중심으로 대용량 태양광전원을 배전계통에 활발하게 연계하고 있는 실정이다. 하지만, 태양광전원이 배전계통에 도입되어 운용되는 경우, 배전계통의 전압 상승 등 전력품질에 관련된 많은 문제점들이 발생되고 있다. 이를 해결하기 위하여, 전력회사에서는 태양광전원이 연계된 배전계통에 수용가 전압을 허용범위 내로 유지하기 위하여, 전력회사에서는 태양광전원이 연계된 배전계통에 선로전압조정장치(SVR, Step Voltage Regulator)를 도입하고 있다. 또한 분산형전원 배전계통연계기준에 따라 분산형전원은 역률 90% 이상으로 유지시켜야 하며, 기술적으로 필요한 경우 역률의 상·하한값을 전력회

사와 협의하도록 규정하고 있으며, 분산형전원의 역률은 배전계통 측에서 볼 때 진상역률(분산형전원 측에서는 지상역률)이 되지 않도록 함을 원칙으로 하고 있다[1]. 그러나 이와 같은 전압안정화 장치 및 기술기준에도 불구하고 태양광 및 소수력과 같은 분산형전원이 대량으로 배전계통에 연계됨에 따라 연계계통의 전압상승 및 전력품질에 관련된 많은 문제점들이 발생하고 있다. 따라서 본 논문에서는 태양광전원이 대량으로 연계된 배전계통에서 전압조정장치(SVR)에 의한 전압제어 문제점을 분석하고, 연계되어 운전 중인 소수력발전기의 역률제한에 따른 운전가능범위와 전압제어 한계점을 분석한다. 또한, 소수력발전기의 전압제어모드별 계통전압 영향을 평가하여, 발전기의 최적운전모드 및 최적전압제어 알고리즘을 제안한다. 또한, 제안한 알고리즘을 구현하여, 전압제어 시뮬레이터와 실 계통에 적용을 통해, 소수력발전소 연계선로의 전압안정화 향상에 기여함을 확인하고자 한다.

2. 분산형전원 연계계통 전압제어 한계 분석

2.1 선로전압조정장치(SVR)에 의한 전압제어

2.1.1 SVR에 의한 배전계통 전압제어

태양광전원이 고압배전선로(22.9kV)에 연계되어 운용되면, 그

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering,
Korea University of Technology and Education, Korea.
E-mail: dsrho@kut.ac.kr

* Dept. of Electrical Engineering, Korea University of Technology
and Education, Korea.

Received : March 7, 2018; Accepted : June 8, 2018

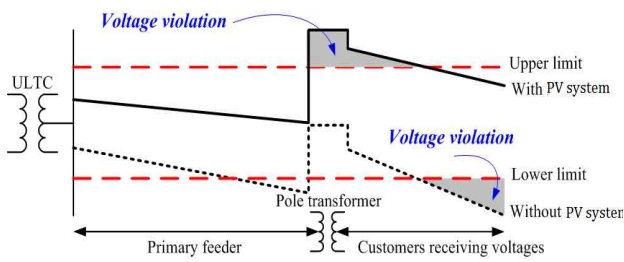
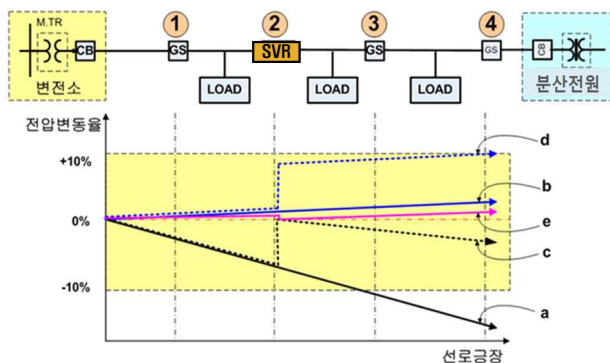


그림 1 태양광전원 운용에 따른 수용가전압 특성
 Fig. 1 Customer voltage according to operating PV system

림 1과 같이 태양광전원 출력에 의하여 배전선로의 전압이 변동하게 되어, 수용가의 전압은 규정범위를 벗어나는 현상이 발생하게 된다. 이에 따라 주상변압기의 탭 위치를 변경시켜주어야 하지만, 현실적으로 태양광전원의 운용 상태에 따라 주상변압기의 탭 위치를 변경시키는 것은 어려운 일이다. 따라서 태양광전원에 의하여 발생하는 전압문제를 해결하기 위한 방안으로 SVR이 도입되어 운영되고 있다. SVR의 운용방식으로는 부하전류에 응동하여 계산된 최적송출전압에 의하여 탭을 조정하는 LDC 조정방식, 부하량과 상관없이 일정한 값을 갖는 일정송출전압방식 그리고 시간에 의하여 정해진 송출전압을 조정하는 프로그램방식 등이 있다. 현행의 SVR은 일정송출전압방식을 사용하고 있는데, 부하변동 및 선로구성에 따라 수용가의 규정전압 유지가 어려운 실정이다[2-4].

2.1.2 SVR 도입에 따른 배전계통 전압제어 한계

일반적으로 변전소에서 멀어질수록 거리에 따라 그림 2의 그래프 a와 같이 계통전압이 강하됨을 알 수 있다. 이때 선로중간에 SVR을 설치해서 그래프 c와 같이 전압을 보상하고 있다. 또한 분산전원이 연계되면 변전소에서 연계지점까지 그래프 b와 같이 계통전압이 상승하게 된다. 특히 그래프 c와 같이 SVR로 전압보상 운전 중에 갑자기 분산전원이 계통에 연계되어 운용되는



GS: 가스개폐기, SVR: 선로전압조정장치, CB: 차단기
 그림 2 분산형전원에 의한 SVR 오동작 사례
 Fig. 2 Case study of SVR malfunction by distributed Generator

경우, SVR의 1-2차 권수비에 따른 계통 임피던스가 변경되어 그 그래프 c에서 d와 같이 계통전압이 상승하게 된다. 그 이유는 종래의 SVR은 기준전압 이하로 떨어지면 전압을 보상하는 일정송출전압방식으로 운용되고 있기 때문이다. 이는 SVR이 설치된 선로에 태양광전원이 도입되어 운용되는 경우에는 전압변동이 더욱 증가하게 되는 현상이 발생하여, 수용가 전압이 규정치를 벗어나는 현상이 더욱 더 많이 발생할 수 있다. 따라서 종래에 0~10 [%] 사이에만 동작을 하는 SVR의 운용방식을 지양하고 -10 [%]~10[%] 사이에 운전될 수 있도록 LDC 운전방식을 채택하면 그래프 e와 같이 분산전원의 발전 시와 미발전시에 관계없이 일정하게 계통전압을 유지할 수 있다[5-6].

2.2 소수력발전소 역할제한운전에 의한 전압제어

2.2.1 계통연계 역할조건

태양광과 같은 분산형전원이 많이 도입되어 운영 중인 배전계통에 연계되는 소수력발전기는 계통의 전압상승을 억제하기 위하여, 분산형전원 배전계통연계 기술기준에 의거하여 분산형전원은 역률 90%이상을 유지해야 하며, 또한 진상영역(분산형전원측 기준)에서 운전해야 한다[1]. 따라서 전력회사에서는 배전계통의 전압특성을 고려하여 발전기별로 계통연계시의 역할조건을 제시하고 있으며, 역할조건사례는 표 1과 같다, A발전기의 경우 진상역률 94% 미만(발전기 기준)에서 운전해야 하며, B발전기의 경우에는 진상역률 92% 미만에서 운전하도록 하고 있다.

표 1 한전에 의한 발전기별 역률제한 범위

Table 1 PF limitation range by generator by Kepco

구분	발전용량	역률제한 (발전기기준)
A발전소	900kW	진상 94% 미만 운전
B발전소	1,500kW	진상 92% 미만 운전

2.2.2 역할조건에 따른 발전기 무효전력 공급가능범위

발전소 연계계통 전압상승 억제를 위한 역할제한에 따라 개별 발전기의 실제 출력가능범위는 제한된다[7]. 즉, A발전기는 그림 3과 같이 진상 85%~94%까지 정격출력 운전이 가능하지만, B발

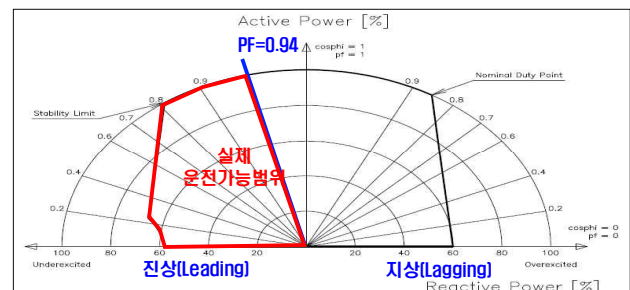


그림 3 A 발전기 역률제한에 따른 운전범위
 Fig. 3 Operation range by PF limitation by A generator

전기의 경우에는 그림 4과 같이 진상 92% 미만 운전시 최대출력 가능용량은 약 600kW로 산정된다. 따라서 표 2와 같이 역률유지 기준에 따라 발전기의 출력을 제한할 수밖에 없어 발전량 손실이 불가피함을 알 수 있다.

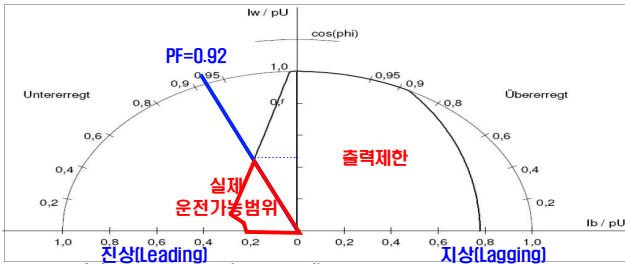


그림 4 B 발전기 역률제한에 따른 운전범위

Fig. 4 Operation range by PF limitation by B generator

표 2 발전기별 역률제한에 의한 운전가능범위

Table 2 Operation range by PF limitation by generator

구분	발전기 용량	역률제한 (발전기 기준)	실제운전범위 (발전기 기준)
A발전소	900kW	지상 85%	진상 85%~94%까지 정격출력 운전가능
B발전소	1,500kW	지상 90%	정격출력 운전불가 출력제한

2.2.3 발전기 역률제한 운전에 따른 전압제어 한계

앞서 설명한 것처럼 소수력발전기는 연계선로의 전압안정화를 위해 계통연계기준에 따라 역률제한 운전을 실시하고 있다. 전력회사에서 제시한 진상역률(발전기기준) 조건에 따라 발전기는 운전하게 되고 무효전력을 흡수하여 계통전압을 감소시키게 된다. 그러나 발전기 역률운전조건은 배전계통에 연계운영중인 태양광 발전이나 부하변동에 상관없이 적용된다. 그림 5는 소수력발전기 (HP ; Hydro Power) 역률제한운전에 따른 계통전압 변화를 나타낸 것이다. 그림 5의 ㉑와 ㉒는 태양광이 계통에 연계되어 있는 경우의 배전계통전압을 나타내고, ㉓와 ㉔는 태양광이 계통에 연계되어 있지 않은 경우의 배전계통전압, ㉕와 ㉖는 소수력발전기 역률제한 운전시의 배전계통전압을 나타낸다. ㉑와 ㉒ 같이 낮 동안 태양광발전으로 인한 배전계통 전압은 상승되므로 발전기 진상역률 운전을 통해 ㉕와 같이 전압을 낮추어 배전계통 전압을 정격범위 내에서 운전하게 할 수 있게 한다. 그러나 밤이나 큰 부하에 의해배전계통의 전압이 ㉓와 같이 낮아진 경우에는 발전기 역률제한운전으로 배전계통 전압을 ㉕같이 더욱 낮게 하여 정격범위를 벗어나게 한다. 따라서 배전계통에 연계되어 운전 중인 발전기의 역률제한운전은 태양광발전이나 부하변동에 따라 적절하게 대응하지 못하므로 배전계통의 전압제어에는 한계가 있다.

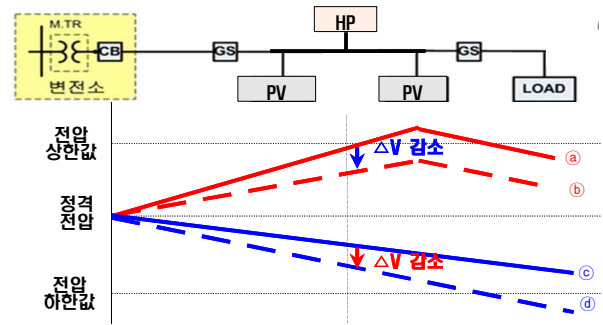


그림 5 발전기 역률제한 운전에 따른 계통전압 변화

Fig. 5 Voltage change according to PF Limitation operation

3. 계통전압안정화를 위한 소수력발전기 최적전압제어 알고리즘 구현

3.1 전압제어모드 특성 및 최적전압제어모드

국내에 설치운영 중인 소수력발전소의 발전기 전압제어는 제어모드(AVR, FCR)와 운전상태(OFF, PF, Var)모드로 구성된다. 표 3는 소수력발전소별 전압제어모드를 나타낸 것으로, 전압제어 방식은 AVR/OFF, AVR/ON, AVR/Var 모드로 발전소별로 달리 적용되고 있다. 제어모드별 특징은 다음과 같다.

표 3 발전소별 전압제어 운전모드

Table 3 Generator voltage control mode by HP

구분	설비용량 (MW)	발전기전압 (kV)	발전기 운전모드
A 발전소	1,000x3	3.3	AVR/OFF
B 발전소	1,650x3	0.69	AVR/PF
C 발전소	1,665x3	6.6	AVR/OFF
D 발전소	1,250x4	0.69	AVR/PF
E 발전소	2,500x2	3.3	AVR/OFF
F 발전소	947x3	0.69	AVR/PF
G 발전소	1,500x2	3.3	AVR/OFF
H 발전소	1,500x2	0.69	AVR/PF
I 발전소	1,500x2	6.6	AVR/OFF
J 발전소	1,500x2	3.3	AVR/OFF
K 발전소	1,500x2	0.69	AVR/PF
L 발전소	660x4	0.48	AVR/VAR
M 발전소	1,500x2	6.6	AVR/VAR
N 발전소	770x3	6.6	AVR/OFF

3.1.1 AVR 모드

AVR 모드는 여차시스템의 가장 중요한 모드로서, 계통연계지점 및 발전기 출력에 관계없이 항상 일정한 전압, 즉 설정치(Setpoint) 전압을 유지시키는 운전 모드이다[8].

3.1.2 Var 모드

Var 모드는 발전기 무효전력을 설정치에 따라 일정하게 제어하는 모드로서, 발전기 전압은 계통연계지점 및 발전기 출력에 의하여 변동하게 된다[8]. 그림 6은 무효전력을 진상운전에서 지상운전까지 단계별로 제어한 것으로 무효전력에 따라 발전기 전압이 감소됨을 알 수 있다. 이 그림에서 상단은 300kVar에서 -100kVar까지 단계별 무효전력을 나타내고, 하단은 무효전력 변화에 따른 계통전압과 발전기 전압조정 특성을 나타낸다.

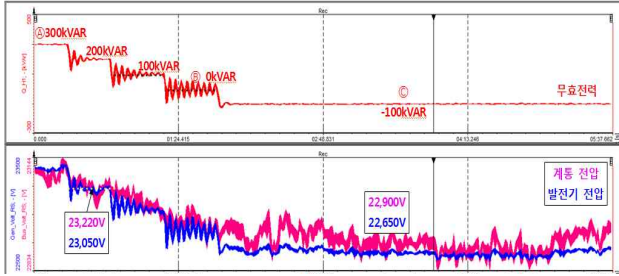


그림 6 Var 모드시 무효전력 변화에 따른 전압제어 특성
Fig. 6 Voltage control characteristic in Var Mode

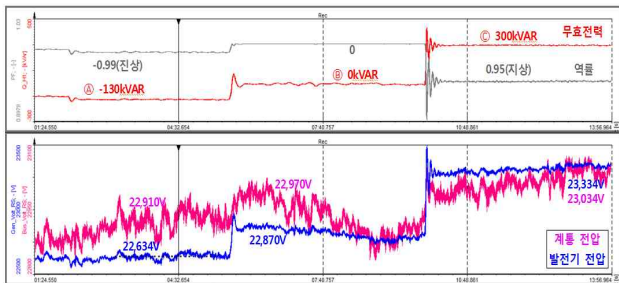


그림 7 PF 모드시 무효전력 변화에 따른 전압제어 특성
Fig. 7 Voltage control characteristic in PF Mode

3.1.3 PF 모드

PF 모드는 발전기의 역률을 설정치에 따라 일정하게 제어하는 모드로서, 발전기 유효 및 무효출력을 가변시켜 역률을 일정하게 제어하게 된다[8]. 이 모드는 한전의 “분산형전원 배전계통 연계기준”에 의거하여 계통연계 조건, 즉 지상 역률 90% 이상인 적정역률을 설정하여 운전하는 방법이다. 그림 7은 단계별 역률 설정치에 따른 무효전력 및 발전기 전압특성을 나타낸 것이다. 여기서, 상단은 역률을 -0.99에서 +0.95까지 단계별로 제어한 것으로 나타낸 것이며, 하단은 역률 변화에 따른 전압조정 특성을 나타낸 것이다.

3.1.4 최적제어모드

상기와 같이, 발전기 여자시스템은 제어모드에 따라 운전특성이 달라지며, 발전소별로 제어모드 설정이 상이한 것을 알 수 있

다. 또한, 분산형전원 연계시 계통전압 상승을 억제하기 위하여, “분산형전원 배전계통 연계기준”에 배전계통에 연계되는 발전기는 진상운전(발전기기준)을 하도록 규정하고 있으며 전력회사에서 발전기별로 계통연계시의 역률조건을 제시하고 있다[1]. 그러나 연계기준에서 제시한 발전기의 PF 모드 및 Var 모드는 설정된 PF나 Var값을 일정하게 제어하므로 연계선로의 태양광 발전 및 부하 변동에 따른 계통전압의 변동에 적절하게 대응하는 데는 한계가 있다. 배전계통전압이 정격전압보다 높으면 발전기 진상운전으로 전압을 낮출 수 있지만, 정격전압보다 낮은 경우, 더욱 전압을 낮게하여 수용가의 전압문제를 야기시킬 수 있다. 그러나 AVR 모드는 부하변동 및 계통전압변동에 상관없이 무효전력을 가변시켜 발전기 전압을 일정하게 제어할 수 있어, 계통전압 안정화에 가장 효과적인 모드라 할 수 있다.

3.2 발전기 최적전압제어 알고리즘 구현

3.2.1 기존 전압제어 알고리즘 한계

앞에서 제시한 바와 같이, 전압제어모드 중 AVR 모드는 계통전압 변동에 가장 적절하게 대응하는 제어모드이다. 그러나 이 제어모드 또한 계통전압 변동에 따른 제어에는 한계점을 가지고 있다. AVR모드의 제어방법은 계통전압(V_L)이 발전기 정격전압(V_G)보다 높은 경우, 그림 8과 같이 발전기가 기동한 후 발전기 정격전압까지 전압을 조정한 후, 동기투입을 위해 계통전압과 비교하여 발전기 전압(V_g)을 보상시키면서 계통에 연계시킨다. 이때의 전압은 발전기 전압(V_{SET})으로 설정되어 계통전압 변화에 상관없이 일정하게 운전하게 된다. 따라서 분산전원이 운전하지 않은 경우에도 역으로 발전기는 연계선로의 전압을 상승시키게 된다. 또한, 계통전압이 발전기 정격전압보다 낮은 경우, 발전기의 설정전압(V_{SET})은 낮은 상태에서 연계하게 되므로 계통전압 변동에 상관없이 낮은 전압으로 운전하게 되어 배전계통 전압을 더욱 강압시키게 된다.

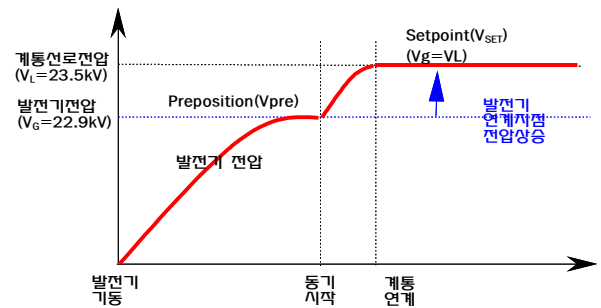


그림 8 기존전압제어 개념도
Fig. 8 Original voltage control concept

3.2.2 최적전압제어 알고리즘 구현

기존 전압제어 알고리즘은 계통연계시의 전압(V_{SET})으로 발전기의 전압을 제어하게 된다. 이는 발전기 전압이 계통연계시의

계통전압조건에 따라 결정되기 때문에 연계운영중인 태양광전원의 운전이나 부하변동에 따른 대응에는 한계가 있다. 그러므로 그림 9과 같이, 발전기가 연계하여 일정시간 이후에 여자기의 설정전압을 발전기 정격전압으로 재설정하여 운전함으로써 계통전압 변동에 상관없이 발전기 전압을 일정하게 제어함으로써 연계계통의 전압안정화에 기여할 수 있다. 이는 배전계통의 전압안정화를 위한 선로전압조정장치(SVR)의 역할을 발전기가 수행하게 된다.

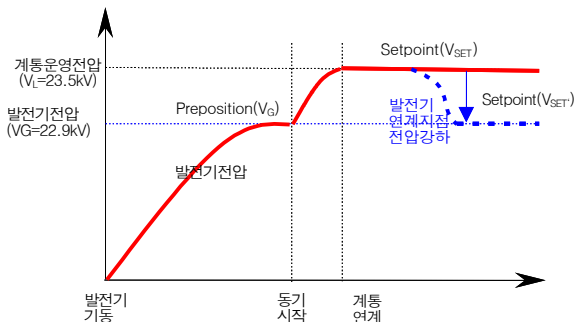


그림 9 최적전압제어 알고리즘 개념도
Fig. 9 Optimal voltage control concept

따라서 제시한 최적전압제어 알고리즘에 대한 자세한 내용은 다음과 같다.

[Step 1] 발전기를 기동시켜, 여자기 초기 설정치(Vpre)까지 전압을 발생시킨다.

[Step 2] 동기투입장치가 작동하여 계통전압(VL)과 동기화가 이루어지면 발전기 전압(Vg)을 제어한다. 이때 차단기를 투입하여, 발전기는 계통연계운전을 하게 되며, 여기서 발전기는 계통전압 변동에 상관없이 설정된 전압으로 일정하게 운전하게 된다.

[Step 3] 계통연계 후 발전기 출력이 정격출력의 일정치 이상이 되면, 발전기는 정격전압(Vset)이 되도록 설정값을 변경시킨다.

[Step 4] 발전기는 정격전압(Vset)이 되도록 전압제어를 반복하여 수행한다.

[Step 5] 발전기 정격전압 제어시 발전기 출력가능곡선 범위 내, 즉 과여자(OEL; Over Excitation Limit)와 저여자(UEL; Under Excitation Limit)사이에서 제어가 가능하면 발전기는 정격전압 운전을 하게 된다.

[Step 6] 발전기 전압 제어시 발전기 출력가능곡선 범위를 벗어나게 되면, 발전기는 제한범위(OEL, UEL) 이내에서 제한적으로 운전하게 된다.

상기의 최적전압제어 알고리즘을 플로차트로 나타내면 그림 10과 같다.

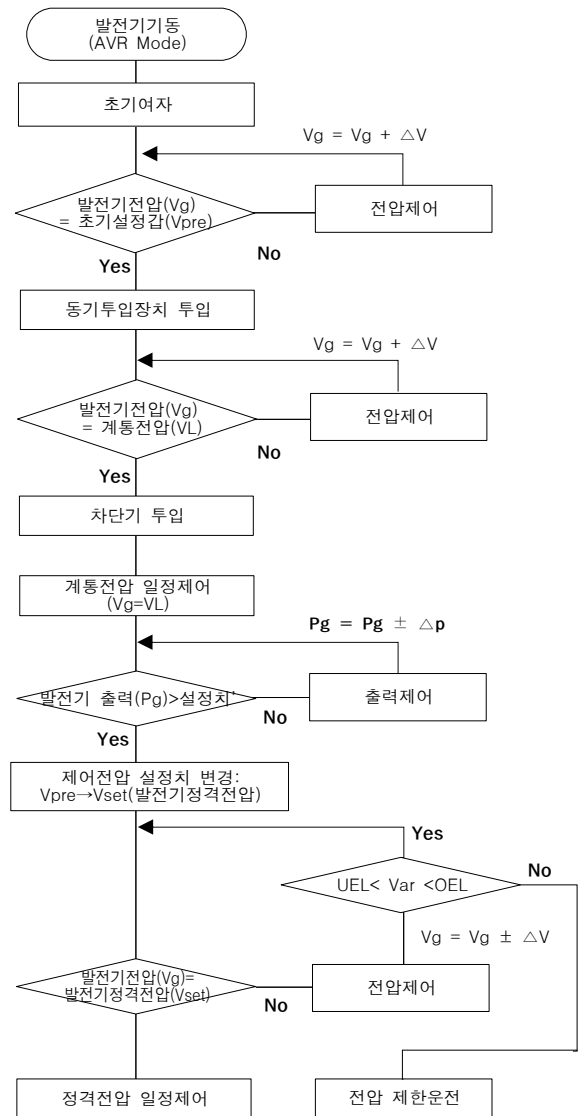


그림 10 최적전압제어 알고리즘
Fig. 10 Optimal voltage control algorithm

따라서 배전계통에 연계운영중인 소수력발전기는 태양광전원 운전이나 부하변동에 따른 계통전압 상승이나 강압에 대응하여 그림 11과 같이 배전계통 전압을 허용범위 안에 있게 한다. 이 그림에서 ㉠과 ㉡는 발전기 최적전압제어 전의 배전계통 전압을 나타내고, ㉢와 ㉣는 발전기 최적전압제어 후의 배전계통 전압을 나타낸 것이다.

3.3 최적제어 알고리즘의 프로그램 구현

발전기가 계통에 연계된 후, 계통전압 조건에 상관없이 항상 발전기 정격전압이 유지될 수 있도록 그림 10의 최적제어 알고리즘을 프로그램으로 구현하면 그림 12와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 사용된 신호의 용어는 표 4와 같다. 이 그림에서와 같이,

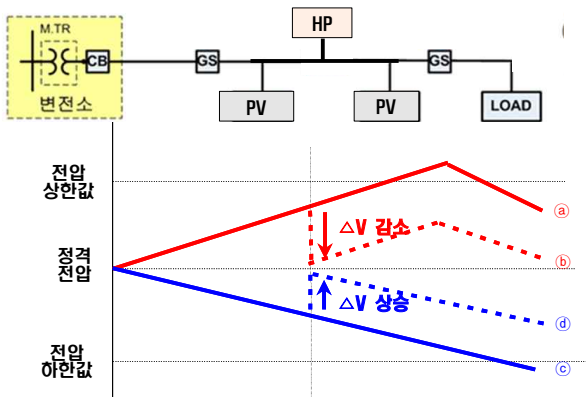


그림 11 최적전압제어에 따른 배전계통 전압
 Fig. 11 Distribution line voltage according to optimal voltage control

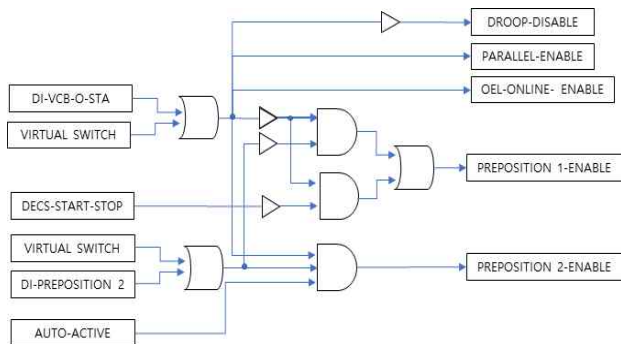


그림 12 최적전압제어 프로그램
 Fig. 12 Optimal voltage control program

표 4 프로그램 신호 내역
 Table 4 Description of program signal

구분	신호	내역
Input	DI-VCB-O-STA	VCB Open Status
	DECS-START-STOP	DECS Start시 On, Stop시 Off
	DI_Preposition_2	Preposition 2 (발전기 전압 100% Setting)
	AUTO-ACTIVE	AVR Mode 시 On
	VIRTUAL SWITCH	Test시 적용
Output	DROOP	발전기 Droop 운전
	PARALLE ONLINE	발전기 병렬운전
	OEL ONLINE	과여자 제한
	PREPOSITION 1	초기 설정값
	PREPOSITION 2	발전기 연계후 운전설정값

발전기를 차단기 동작과 함께 발전기는 계통연계를 위해 Parallel 이 Enable되고, OEL이 동작하게 된다. 또한, 발전기를 차단기가 On되고 제어가 Start되면, 발전기 전압은 초기 설정값(Pre

position 1)으로 제어된다. 발전기 출력이 30%이상이 되면, PLC 에서 발전기 계통연계 후 발전기 정격전압 운전조건(Preposition 2)을 On시키고, 프로그램에 의해 정격전압 운전을 하게 된다. 한편, 발전기 정지신호(DECS_Start_Stop)시에는 초기 설정값 (Preposition 1)으로 변경되어 다음 기동을 준비하게 된다.

4. 시뮬레이션 및 실 계통 적용

4.1 여자시스템 시뮬레이터를 통한 최적전압제어 알고리즘 검증

본 연구에서 제안한 최적전압제어 프로그램을 여자시스템 모 의 시뮬레이터인 RTS-7000에 구현하여[9], 그 성능을 분석한 결 과는 그림 13과 같다.

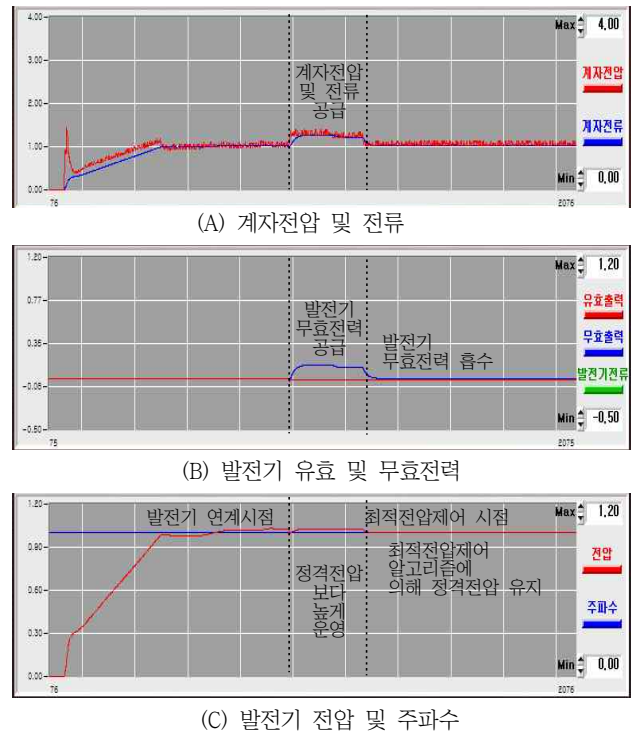
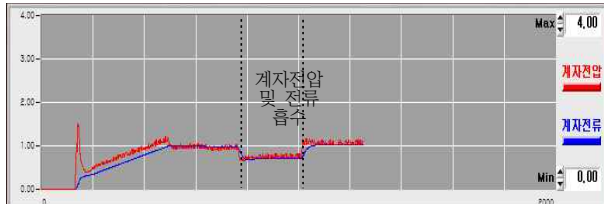
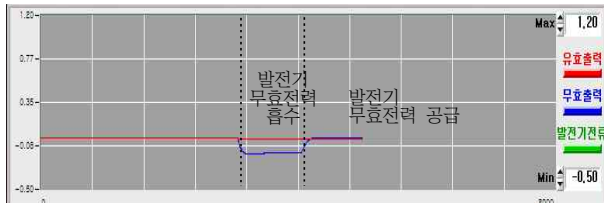


그림 13 정격전압보다 계통전압이 높은 경우 전압제어
 Fig. 13 Voltage control in case of higher power system voltage than rated voltage

그림 13의 (A)는 계자전압과 전류를 나타내고, (B)는 발전기 유효 및 무효전력, (C)는 발전기 전압을 나타낸다. 만약 계통전압 이 발전기의 정격전압보다 높은 경우, 소수력발전기를 계통에 연 계하면, 최적전압제어 알고리즘에 의해 그림 A의 계자전류 및 그 림 B의 무효전력 제어에 의하여, 그림 C와 같이 계통 연계점의 전압을 발전기의 정격전압으로 제어하여, 본 연구에서 제안한 알 고리즘의 유용성을 확인하였다.



(A) 계통전압 및 전류



(B) 발전기 유효 및 무효전력



(C) 발전기 전압 및 주파수

그림 14 정격전압보다 계통전압이 낮은 경우 전압제어

Fig. 14 Voltage control in case of higher rated voltage than power system voltage

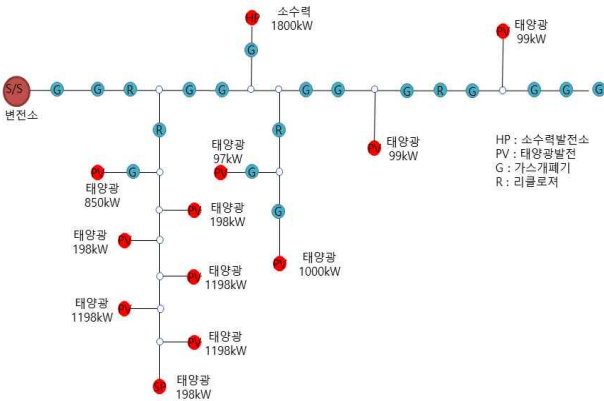


그림 15 최적전압제어 알고리즘 검증을 위한 배전선로

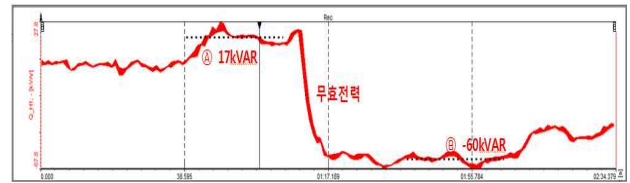
Fig. 15 Distribution line for confirming optimal voltage control algorithm

그림 14는 계통전압이 발전기의 정격전압보다 낮은 상태에서 발전기가 계통에 연계되는 경우를 나타낸 것이다. 즉, 최적전압제어 알고리즘에 의해 발전기가 무효전력을 공급함으로써 계통 연계지점의 전압을 정격전압으로 제어하고 있음을 확인하였다.

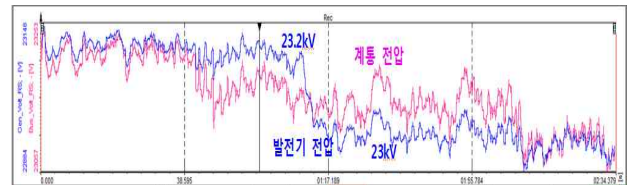
표 5 배전계통의 특성

Table 5 Specification of distribution line

구분	거리 및 용량
간선 공장	40.5km
소수력발전소까지 공장	13.2km
태양광발전 총용량	6.333MW
소수력발전 설비용량	1.8MW
Peak 부하	9.8MW
Off-peak 부하	3.7MW



(A) 무효전력 변동



(B) 발전기 및 계통 전압 변동

그림 16 실 계통 시뮬레이션 결과

Fig. 16 Simulation result in real grid

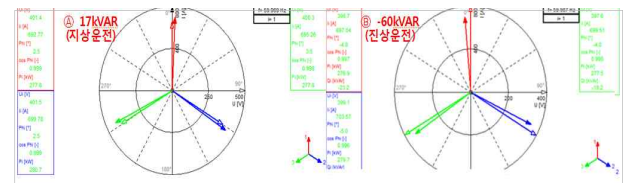


그림 17 전상 및 지상운전시의 역률벡터도

Fig. 17 PF vector of lead and lag operation

4.2 실 계통 적용을 통한 최적전압제어 알고리즘 검증

그림 15는 대용량 태양광전원과 소수력발전기가 연계되어 있는 합천변전소의 용주 D/L을 나타낸 것이다. 배전계통은 표 5와 같이 선로 공장이 40.5km이며, 설비용량이 1.8MW인 소수력발전소는 변전소에서 13.2km 떨어진 곳에 위치하고 있다. 태양광전원은 6.333MW가 연계되어 있으며, 부하는 Peak시에 9.8MW, Off-peak시에 3.7MW까지 변동이 매우 심한 상태로, 대용량 태양광 전원이 운전되는 시간에는 배전선로의 전압은 공칭전압보다 상당히 높은 상태에서 운영되고 있다.

따라서, 본 논문에서 제안한 소수력 발전기 최적전압제어 알고리즘을 이용하여, 배전선로의 계통전압 특성을 분석하였다. 그 결과는 그림 16과 같으며, 그림 16의 A는 무효전력의 변동을 나타내고, B는 그에 따른 발전기 연계지점의 전압 변동을 나타낸다. 그림 17은 그림 16의 무효전력 변동에 따라 지상과 진상운전시의 역률 벡터도를 나타낸다. 그림 16에서와 같이 발전기의 AVR 모드인 경우, 계통 연계점의 전압이 23.2kV에서 운전되고 있는 상태에서 발전기 전압을 23kV로 설정하여 운전하면, 발전기의 무효전력 제어에 의하여 연계지점의 계통전압이 0.2kV 정도 낮아지고 있음을 확인하였다. 따라서 본 논문에서 제시한 최적전압제어 알고리즘에 의하여, 대응량의 태양광전원이 도입되어도 계통연계 지점의 전압을 일정하게 제어할 수 있어, 계통전압 안정화에 기여할 수 있음을 확인하였다.

5. 결 론

본 논문에서는 대응량의 태양광전원이 연계된 배전계통에서 전압제어 문제점을 해결하기 위하여 소수력발전기를 이용한 최적전압제어알고리즘을 제시하였다. 또한 제안한 알고리즘을 구현하여, 여자시스템 시뮬레이터와 실 계통 구현을 통해 최적전압제어 알고리즘의 유용성을 확인하였다. 이에 대한 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 본 연구에서 제안한 최적전압제어 프로그램을 여자시스템 모의 시뮬레이터인 RTS-7000에 구현하여, 그 성능을 분석하였다. 계통전압이 발전기의 정격전압보다 높은 경우, 최적전압제어 알고리즘에 의해 계자전류 및 무효전력 제어에 의하여, 계통 연계점의 전압이 발전기의 정격전압으로 일정하게 제어되어 제안한 알고리즘의 유용성을 확인하였다.

(2) 대응량 태양광전원 및 소수력발전기가 연계되어 있는 실 계통에 본 연구에서 제안한 소수력발전기 최적전압제어 알고리즘을 이용하여, 배전선로의 계통전압 특성을 분석하였다. 계통 연계점의 전압이 23.2kV에서 운전되고 있는 상태에서 발전기 전압을 23kV로 설정하여 운전한 결과, 발전기의 무효전력 제어에 의하여 연계지점의 계통전압이 0.2kV 정도 낮아지고 있음을 확인하였다. 따라서 본 논문에서 제시한 최적전압제어 알고리즘에 의하여, 대응량의 태양광전원이 도입되어도 계통연계 지점의 전압을 일정하게 제어할 수 있어, 계통전압 안정화에 기여할 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구(No.20163010012310, No.20172410100030)로서, 관계부처에 감사드립니다.

References

- [1] Technical guidelines for the distributed generators.
- [2] New distribution engineering, Bookshill. 2014.
- [3] Electrical Power System Quality, second edition, Roger C. Dugan, Mark F. McGranaghan, Surya Santoso, H. Wayne Beaty.
- [4] EPRI-RP3098-01, An Assessment of Distribution System Power Quality.
- [5] Byungki Kim and Daeseok Rho, "Optimal Operation Methods of Protection Devices in Distribution Systems with PV Systems", *Smart Computing Review*, vol. 4, no. 6, pp. 506-514, 2014.12.
- [6] Byungki Kim. "A Study on the Voltage Regulation Method of Distribution System Using Step Voltage Regulator and Energy Storage System", *Doctor thesis*, 2015. 8
- [7] Sibook Nam, "A study about extending usage of capability curve of generator", *Journal of Electrical Engineering and Technology*, vol. 49, no. 2, pp. 66-73, 2000.
- [8] DECS 250, Digital excitation control system manual, Basler Electric.
- [9] RTS-7000, Generator excitation system test simulator, Manufacturer E2S.

저 자 소 개



최 홍 열(Hong-Yeol Choi)

1998년 2월 : 동아대학교 전기공학과(공학사),
2008년 2월 : 충남대학교 전기공학과(공학석사),
2015년 3월~현재 : 한국기술교육대학교 전기공학과 박사과정 재학 중, 1998년 1월 ~ 현재 : 한국수자원공사 근무 중



최 성 식 (Sung-Sik Choi)

2010년 5월 : 한국기술교육대학교 정보통신공학부(공학사), 2014년 8월 : 동대학원 전기공학과(공학석사), 2015년 2월~현재 : 동대학원 전기공학과 박사과정 재학 중
<관심분야> 배전계통 운용, 신재생에너지, 마이크로 그리드, 품질해석, ESS



강 민 관 (Min-Kwan Kang)

2005년 2월 : 한국기술교육대학교 전기공학과(공학사), 2007년 2월 : 동대학원 전기공학과(공학석사), 2016년 9월~현재 : 동대학원 전기공학과 박사과정 재학중
<관심분야> 신재생에너지, 전력계통, 마이크로그리드



노 대 석 (Dae-Seok Rho)

1985년 2월 : 고려대학교 전기공학과(공학사), 1987년 2월 : 동대학원 전기공학과(공학석사), 1997년 3월 : 일본 북해도대학교대학원 전기공학과(공학박사), 1987년 3월~ 1998년 8월 : 한국전기연구소 연구원/선임연구원, 1999년 3월~현재 : 한국 기술교육대학교 전기전자통신공학부 교수
<관심분야> 전력/배전 계통, 분산전원연계, 전력품질해석