

분산형전원이 도입된 복합배전계통의 운용방안에 대한 고찰

論 文
48A-6-5

A Study on Operation Method of Power Distribution System Integrated with Dispersed Generation System

金在彦* · 曹聖鉉**
(Jae-Eon Kim · Sung-Hyun Cho)

Abstract - This paper analyzes the effect of DGS(Dispersed Generation System) on the voltage regulation of the traditional distribution system of which the voltage is controlled by the bank LDC(Line Drop Compensator). Through the simulation results for 22.9kV class distribution system with DGSs, some general relationships among the operating power factor and introduction limit of DGS, and the sending-end reference voltage determined by internal setting coefficients of the LDC are derived. Those relationships are that the introduction limit of DGS increases as the power factor of DGS goes from lagging to leading and also as the allowance of the sending-end reference voltage increases. From the relationships, a operation method of the power distribution system integrated with DGSs is proposed from the view point of the operating power factor of DGS and new voltage regulation method.

Key Words : Power Distribution System, Dispersed Generation System, Voltage Regulation, Operation Method

1. 서 론

경제성장과 산업·사회활동의 고도화에 따라서 증대되는 전력수요에 대해 에너지자원과 지구환경의 제약문제가 대두되고 있는 근래의 상황하에서, 전력수급의 장기적 안정을 확보하기 위해서는 전력수급양면에 걸친 대책이 필수 불가결하다. 종래까지의 전력공급은 대규모 전원의 개발에 의존하여 왔지만, 최근 다양한 에너지원의 효율적 활용을 위한 한 방법으로서 분산형전원의 적극적 개발과 도입이 관심을 모으고 있다. 이와 같은 상황에서 국내외에 분산형전원이 전력계통 중에서도 특히 먼저 배전계통에 이의 도입이 시작되고 있다.

분산형전원(Dispersed Generation System)이란, 태양광발전, 열병합발전, 연료전지발전, 풍력발전 등의 기술을 이용한 소규모의 발전시스템을 의미하며, 이들의 전원은 그 소유와 운영의 주체관점에서 보면, 그 대부분이 비전기사업자의 발전설비로서 전기사업자가 그의 계획, 관리 및 운용을 집중적으로 수행할 수 있는 기존의 전원과는 그 성격이 다르다. 또한, 이들 분산형전원은 전력계통과는 별도로 독립적으로 운용할 수도 있지만, 전력계통과 연계된 상태에서 운전함으로써 수용가 측면에서는 보다 안정한 전력의 확보, 전기사업자 측면에서는 전력설비의 효율적인 활용, 전체적인 측면에서는 자원의 효율적인 활용 등의 이점을 얻을 수 있다.

그러나, 분산형전원이 도입된 배전계통은 기존의 부하만이 존재하는 배전계통과는 달리 부하와 전원이 혼재되어 운용되

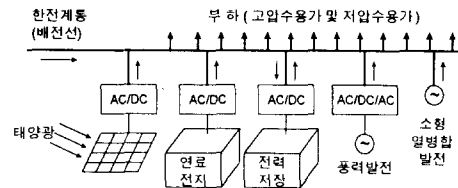


그림 1 분산형전원이 도입된 복합배전계통의 이미지
Fig. 1 Image of power distribution system integrated with DGSs

는 형태로 되기 때문에 전력회사의 입장에서는 분산형전원의 본격적인 배전계통 도입시에

- i) 전력품질(고조파, 전압변동 등)과 보호협조에의 영향
- ii) 기존의 배전계통운용체제하에서 연계가 가능한 분산형전원의 도입한계량
- iii) 도입한계량 초과시의 운용방안

을 사전에 검토·분석하여 분산형전원이 도입된 배전계통(전원과 부하가 혼재한다는 의미에서 이후부터는 이를 복합배전계통이라는 용어로 대체함: 그림1)의 운용방안을 확립해 둘 필요가 있다. 특히, 장래 규제완화로 인한 소규모 전기사업자의 등장과 지역에너지사업의 확대에 의한 열병합발전설비의 보급확대, 그리고 건물마다 마련된 비상용발전기의 상용발전기로의 전환 등을 고려한다면, 복합배전계통의 운용문제는 상당히 심각한 문제로 대두될 것으로 보인다. 그럼에도 불구하고 지금까지 발표된 연구논문은 i)만을 다루었고^{[1]-[6]}, ii)와 iii)에 대해 연구 발표된 논문은 없었다.

i)의 경우는, 그 발전기의 형태가 회전기(동기발전기, 유도

* 正 會 員 : 忠北大 電氣電子工學部 專任講師 · 工博

** 正 會 員 : 忠北大 大學院 電氣工學科 博士課程

接受日字 : 1998年 12月 3日

最終完了 : 1999年 5月 13日

발전기)와 정지기(인버터)로 나뉘어지는 분산형전원중 특히 정지기의 직류/교류 변환에 의한 고조파발생, 분산형전원의 출력변화에 의해 배전계통의 전력조류변화(기존의 단방향전력조류변화와는 다른 양방향전력조류변화)로 생기는 배전선로의 전압변동, 분산형전원의 연계에 따른 배전계통의 단락용량의 증가, 사고시 고장구간의 분리과 선로재구성에 따른 차단기 및 개폐기의 동작알고리즘에 관계되는 보호협조문제 등으로 구분될 수 있다. 따라서, 이들은 ii)의 기존 배전계통은 용체제하에서 연계가 가능한 분산형전원의 도입한계량을 결정하는 데 중요한 요소로서 고려될 수 있다. 그러나, 고조파발생의 경우는 필터, 단락용량증가에 대해서는 회전기와 정지기의 한류리액터와 전류제한기능, 보호협조의 경우는 보호릴레이의 협조조정 등으로 각각 대처가 가능하여 결국, 분산형전원의 도입한계량을 결정짓는 데에는 선로의 전압변동이 중요한 요소로서 고려되어야 할 필요성이 있다.

한편, 기존의 대부분의 배전계통에 있어서 전압조정은 변전소의 MTR뱅크에 설치되어 있는 LDC(Line Drop Compensator)와 LRT(Load-Ratio control Transformer)에 의해 이루어지고 있다. 즉, 선로의 부하패턴을 고려하여 LDC내부의 정정계수인 R(부하중심점까지의 등가저항), X(부하중심점까지의 등가리액턴스), V_0 (부하중심점의 유지기준전압)를 설정해 두고, 뱅크부하전류에 따라서 뱅크의 송출기준전압중심으로 LRT의 탭을 동작시킴으로써 뱅크의 송출전압을 조정하고 있다. 그러나, 비전기사업자소유의 분산형전원이 이러한 배전계통에 도입될 경우, 설치운영자의 목적에 맞게 운전하는 관계 또는 태양광 및 풍력의 경우와 같이 날씨관계로 그 운전패턴이 일정하지 않기 때문에, 부하만이 존재하는 일반선로의 계절별 및 년별 부하패턴이 거의 일정한 것과는 달리 분산형전원이 도입된 선로의 최종부하패턴(분산형전원의 운전패턴 + 부하의 운전패턴)은 일정치 않게 된다. 따라서, 본 저자는 분산형전원의 도입이 6.6kV급 배전계통의 전압조정에 미치는 영향을 분석하고, 전압조정측면에서 본 분산형전원의 도입한계량을 결정하는 방법을 참고문헌 [7]에 제시하였다.

이와 같은 배경 하에 본 논문에서는 분산형전원이 도입된 복합배전계통의 운용방안을 제시하기에 앞서, 2장과 3장에서 참고문헌[7]에서 제시된 방법을 이용하여 분산형전원의 배전계통도입이 기존의 LDC에 의해 전압조정되는 22.9kV급 배전계통의 송출기준전압과 송출전압 및 220V저압수용가의 단자전압에 미치는 영향을 분석하고, 그 도입한계량을 산출하여 본다. 4장에서는 그 결과를 참고문헌[7]의 결과와 비교·분석함으로써 분산형전원의 운전역률과 도입한계량 및 LDC내부의 정정계수에 의해 결정되는 송출기준전압사이의 일반적 상관관계를 확실히 규명한다. 한편, 배전계통에 도입되는 분산형전원의 도입량은 그 보급단계 즉, 초기단계, 중간(활성화)단계, 성숙단계에 따라서 다르기 때문에 복합배전계통의 운용관리방안에는 분산형전원의 보급단계를 고려해 넣을 필요가 있다. 그러므로 이 사항도 고려해서 전압조정측면에서 본 복합배전계통의 운용방안을 전술의 도출된 일반적 상관관계에 근거하여 보급단계별로 제시하기로 한다.

2. 분산형전원의 도입이 22.9kV급 배전계통의 전압조정에 미치는 영향분석

본 장에서는 LDC에 의해 전압이 조정되는 22.9kV급 배전계통을 모델로 선정하여 분산형전원의 도입이 배전전압조정에 미치는 영향을 LDC동작의 시뮬레이션을 통하여 분석해 보기로 한다.

먼저, 모델배전계통으로서는 주변압기 용량 45MVA, 공장 12.5 km의 22.9kV급 배전선로 4개, 각 22.9kV 배전선로의 부하노드 50개, 각 노드에는 정전력의 부하가 균등분포하고 있는 그림2와 같은 계통을 고려하였고, 이 계통의 특징을 하기에 상세히 기술한다(22.9kV 배전선로의 기준용량은 100MVA, 기준전압은 22.9kV로 하였음).

- 주변압기의 1차측 전압은 $1.0 \angle 0^\circ$ 로 일정히 유지되는 것으로 하였다.
- 주변압기의 임피던스 $Z = jX_T = j0.05$ p.u.
- 22.9kV 배전선로의 임피던스 $Z : 0.0347+j0.0746$ p.u./km
- 22.9kV 배전선로상의 부하 : 0.25km 간격으로 50개의 부하노드를 고려하였고, 각 노드의 부하를 지상역률0.9의 정전력부하로 중부하시는 $10MVA \times 0.9$ (부하역률) \div 50개 \div 100MVA (pu기준용량) p.u., 경부하시의 중부하시의 4분의1($0.25 \times 10MVA \times 0.9 \div 50$ 개 \div 100MVA p.u.)로 하였다.
- 중부하시 주상변압기의 평균전압강하 0.02 p.u., 저압배전선의 평균전압강하 0.04 p.u., 저압배전선말단의 전압강하 0.07 p.u., 고압선말단까지의 최대전압강하 0.039196 p.u.로 하고, 경부하시의 경우는 각각 중부하시의 4분의 1로 하였다. 또한, 주상변압기의 탭은 0.99839 p.u. / 1.0 p.u. ($\sqrt{3} \times 13200V \div 22900V / 220V \div 220V$)의 1종류로 하였다.
- LRT의 탭동작에 있어서는 그림2의 전압비교기의 동작불감대를 ± 0.01 p.u.로, 탭간격은 0.01 p.u.로 하였다.
- 저압수용가 단자전압 허용범위의 상한치를 233V, 하한치를 207V로 하고, 그 적정전압기준치는 220V로 한다.

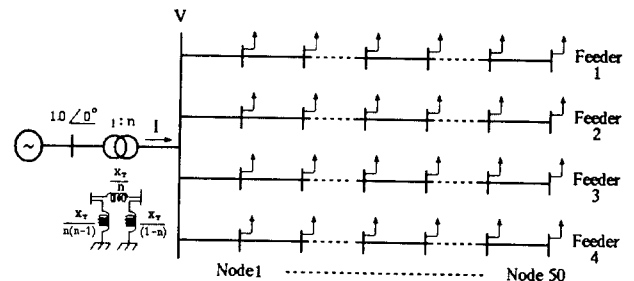


그림 2 모델 배전계통
Fig. 2 Model distribution system

그림2와 같은 배전계통모델에 있어서, 중부하시 최대부하전류 및 부하역률, 그리고 경부하시의 최소부하전류는 각각 $I_{max}=0.38044$ p.u., $\cos \theta_{max}=0.891$, $I_{min}=0.09885$ p.u.로 되어, 이때의 $V_{ref,max}=1.07789$, $V_{ref,min}=1.01846$ 로 구해져, 이것을 기본데이터로 하여 LDC내부의 셀팅계수 R, X, V_0 는 참고문헌 [7]의 식(2)~(4)에 의거 각각 0.18825, 0.09584, 0.99752로 산출되었다.

한편, 배전계통에 연계되는 분산형전원의 경우, 통상 발전기의 역률을 일정히 유지하는 자동역률조정장치에 의해 정역률운전을 실시하고 있는 데, 이것은 발전역률 및 전압, 그리고 계통전압의 검출로 일정역률로 유지하도록 AVR에 의한 계통전압추종운전을 한다. 따라서, 여기에서는 분산형전원의 출력은 $P_G + jQ_G$ 의 일정출력으로 하고, 그 출력전압은 계통전압에 의해 지배되는 되는 것으로 한다. 본 시뮬레이션에서는 운전역률1.0, $P_G=0.09$ p.u.의 분산형전원이 피더1의 노드50에 연계된 상황을 고려한다.

먼저, 분산형전원의 도입이 고려되지 않은 본래의 배전계통에 있어서 경부하시에서 중부하시 또는 중부하시에서 경부하시로 변화해 갈 때의 송출기준전압변화와 송출전압변화를 시뮬레이션한 결과를 그림3에, 그리고 이 때 경부하시 및 중부하시의 배전선로 전압변화를 그림 4에 제시한다. 그림3에서는 세로축은 전압의 크기, 가로축은 최대부하를 1.0으로 정규화한 부하값을 나타내며, 그림4에서의 가로축은 부하노드이다. 그림4에서는 주변압기의 송출전압은 송출기준전압을 중심으로 하여 LDC장치내부의 전압비교기의 동작불감대 ± 0.01 p.u.내로 조정되고 있다. 한편, 이 때 중부하 및 경부하시의 배전선로의 전압변화를 그림5에서 살펴보면, 수용가 단자전압유지의 허용범위 207V~233V를 고려한 중부하시 고압 배전선의 유지범위 $1.02925((207V+220V \times 0.02+220V \times 0.07) \div 220V \times 0.99839)$ p.u. ~ $1.07735((233V+220V \times 0.02) \div 220V \times 0.99839)$ p.u., 경부하시 고압배전선의 유지범위 $0.96186((207V+220V \times 0.02 \div 4+220V \times 0.07 \div 4) \div 220V \times 0.99839)$ p.u. ~ $1.06238((233V+220V \times 0.02 \div 4) \div 220V \times 0.99829)$ p.u.을 모두 만족하고 있다. 따라서 선정된 모델 배전계통은 수용가 단자전압의 허용범위를 잘 유지할 수 있도록 전압조정이 이루어짐을 알 수 있다.

그러나, 상기와 같이 잘 운용되고 있는 배전계통에 분산형전원이 도입된 경우를 그림5와 그림6에서 살펴보면, 그림5에서 송출기준전압과 송출전압이 그림3에 비해서 전체적으로 낮고, 그림6에서 중부하시 분산형전원이 연계되어 있지 않은 피더 2,3,4의 노드28번 이후가 모두 전압유지 허용범위이하로 되어 있다. 이것은 배전계통에 분산형전원이 도입됨으로써 주변압기 2차측의 부하전류가 그 만큼 감소되어 참고문헌[7]의 식(5)에 의거 송출기준전압이 저하하여 결국 LDC동작특성에 의해 송출전압이 저하하게 된다는 것으로 설명될 수 있다. 결국, 전압유지 허용범위의 여유가 있는 경부하시보다는 그 여유가 적은 중부하시에 송출전압저하로 인해 저전압 수용가가 발생한다는 것을 알 수 있다.

이상의 분석결과로부터 LDC에 의해 전압이 조정되는 배전계통에 분산형전원이 도입될 경우, 배전용변전소 주변압기의 송출기준전압의 저하로 송출전압이 낮아져, 최종적으로는 중부하시, 선로 말단부 저압수용가의 단자전압이 적정유지범위를 벗어날 우려가 있다는 결론을 얻었다. 이 결과는 참고문헌[7]의 결과와 동일하였다.

3. LDC 전압조정방식의 22.9kV급 배전계통에 도입되는 분산형전원의 도입한계량산출

분산형전원이 도입된 배전계통의 적정한 전압조정을 위해서는 전술의 분석결과에 의거 계통특성에 의해 설정되어 있

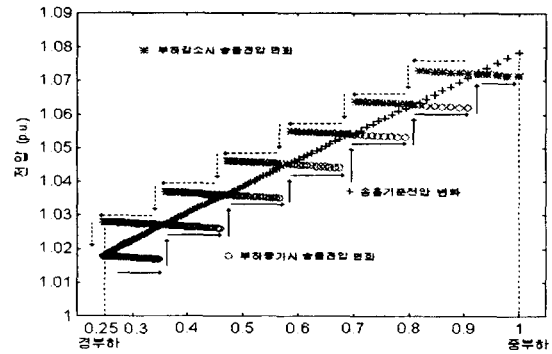
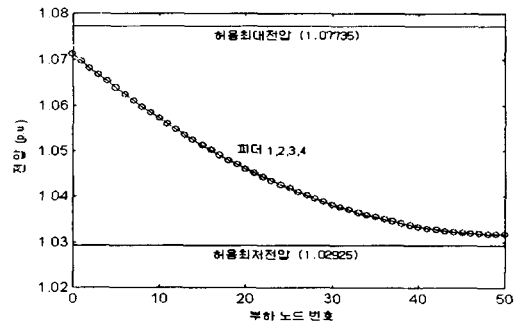
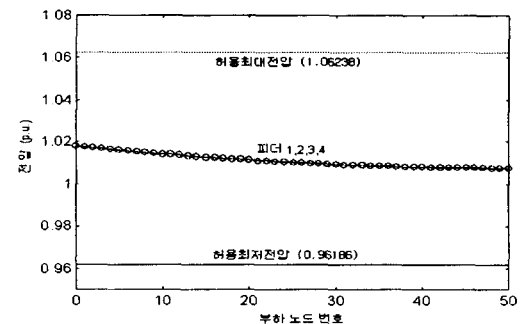


그림 3 DGS가 도입되지 않은 경우의 송출기준전압 및 송출전압의 변화

Fig. 3 Behavior of sending-end reference voltage of LDC and sending-end voltage in model distribution system without DGS



a. 경부하시



b. 중부하시

그림 4 DGS가 도입되지 않은 경우의 선로전압

Fig. 4 Voltage profiles in model distribution system without DGS

는 LDC의 송출기준전압 저하의 허용한도를 설정하여 두어 이 허용한도까지 분산형전원의 도입량을 제한할 필요가 있다. 그러나 주변압기 이하의 모든 부하조건과 선로상태를 대상으로 하여 전 절에서 수행하였던 부하전류에 따른 LDC동작의 시뮬레이션으로부터 분산형전원의 도입한계량을 구한다는 것은 현실적이지 못하다. 따라서, 여기에서는 참고문헌[7]의 내용에 기준하여 송출기준전압의 저하와 분산형전원의 도입량과의 관계식을 유도하여 이로부터 LDC 전압조정방식의

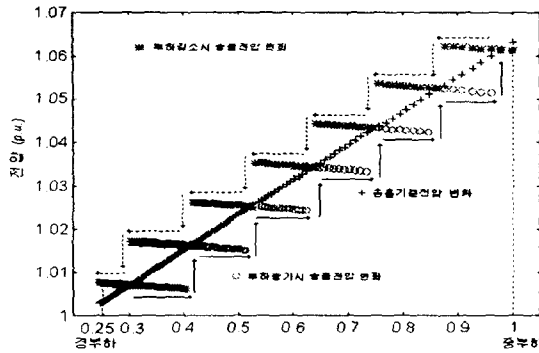
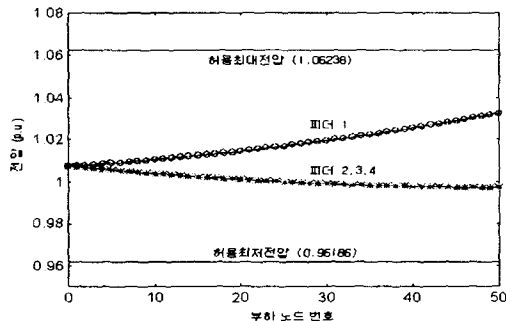
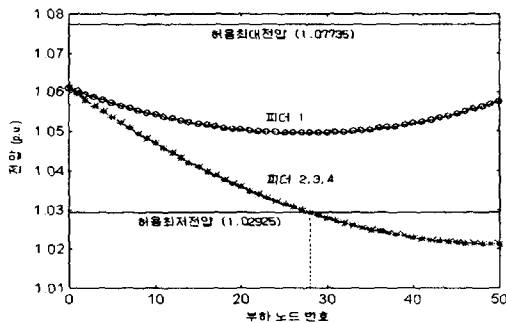


그림 5 DGS가 도입된 경우의 송출기준전압 및 송출전압의 변화

Fig. 5 Behavior of sending-end reference voltage of LDC and sending-end voltage in model distribution system with DGS



a. 경부하시



b. 중부하시

그림 6 DGS가 도입된 경우의 선로전압

Fig. 6 Voltage profiles in model distribution system with DGS

22.9kV급 배전계통에 도입되는 분산형전원의 도입한계량을 산출하여 보기로 한다.

3.1 DGS의 도입한계량을 결정하는 관계식 유도

송출기준전압저하와 도입량과의 관계식유도를 위해 그림2의 피더전체의 부하전류를 I_{load} 로, 주변압기 이하 어느 한 피더에 도입된 분산형전원의 출력을 전류 I_G 로 하여 이를 주변

압기2차측 직하로 연결하는 그림7과 같은 등가축약모델을 생각한다. 이 모델은 주변압기2차측 직하의 전압과 전류에 대해서 주변압기2차측 이하의 어느 피더에 분산형전원이 도입된 그림2와 동가임을 알 수 있다. 여기서 LDC는 주변압기 2차측을 흐르는 전류 I 에 의해 조정되는 1 : n의 tap조정에 포함시켜 표현하기로 한다.

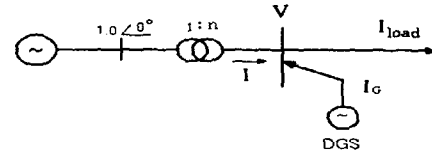


그림 7 주변압기2차측단자에서 본 DGS가 도입된 그림2의 등가축약모델

Fig. 7 Equivalent model of Fig. 2 with DGS from the view point of the secondary terminal of the Bank.

그림7에 있어서 DGS가 도입되지 않은 모델 배전계통에 있어서, 계통특성에 의해 결정된 LDC전압조정장치의 셀팅계수를 R, X, V_o 로 둘 경우, 주변압기 2차측전류I와 그 때의 역률각 θ 에 대한 송출기준전압은 참고문헌[7]의 식(5)로부터

$$\begin{aligned} V_{ref} &= (R \cos \theta + X \sin \theta) I + V_o \\ &= R I_p + X I_q + V_o \end{aligned} \quad (1)$$

$$\text{단, } I_p = I \cos \theta, I_q = I \sin \theta$$

된다. 이 운전상황에서 DGS가 도입되었을 경우, 주변압기 2차측전류 I_m 과 그 때의 역률각 θ_m 에 대한 송출기준전압 $V_{ref,m}$ 은

$$\begin{aligned} V_{ref,m} &= (R \cos \theta_m + X \sin \theta_m) I_m + V_o \\ &= R I_{m,p} + X I_{m,q} + V_o \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{단, } I_{m,p} = I_m \cos \theta_m, I_{m,q} = I_m \sin \theta_m$$

로 된다. (1)식과 (2)식으로부터 DGS가 도입되지 않은 경우와 도입된 경우의 송출기준전압의 차 ΔV_{ref} 는 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \Delta V_{ref} &= R(I_p - I_{m,p}) + X(I_q - I_{m,q}) \\ &= R \Delta I_p + X \Delta I_q \end{aligned} \quad (3)$$

$$\text{단, } \Delta I_p = I_p - I_{m,p}, \Delta I_q = I_q - I_{m,q}$$

한편, 그림7의 DGS의 출력전류와 역률각을 각각 I_G 와 θ_G 로 하면, (3)식의 ΔI_p 와 ΔI_q 는 $I_G \cos \theta_G$ 와 $I_G \sin \theta_G$ 로 근사화될 수 있으므로 상기의 (3)식은

$$\Delta V_{ref} = (R \cos \theta_G + X \sin \theta_G) I_G \quad (4)$$

로 표현될 수 있다. 이 때 계통운영자의 판단에 의해 DGS 도입시 송출기준전압저하의 허용한도 $\Delta V_{ref,max}$ 가 주어지고, 또한 DGS의 운전역률 θ_G 가 알려지면, DGS의 도입한계량 $I_{G,max}$ 는

$$I_{G,max} = \Delta V_{ref,max} / (R \cos \theta_G + X \sin \theta_G) \quad (5)$$

로 된다. (5)식으로부터 얻어진 $I_{G,max}$ 와 운전역률각 θ_G 및 저하된 송출기준전압 $V_{ref} - \Delta V_{ref,max}$ 를 이용해서 DGS 도입한 계량의 유효전력출력 $P_{G,max}$ 와 무효전력출력 $Q_{G,max}$ 가 각각

$$P_{G,max} \doteq (V_{ref} - \Delta V_{ref,max}) I_{G,max} \cos \theta_G \quad (6)$$

$$Q_{G,max} \doteq (V_{ref} - \Delta V_{ref,max}) I_{G,max} \sin \theta_G \quad (7)$$

과 같이 근사적으로 구해질 수 있다. 전 절에서 살펴본 바와 같이 전압저하가 문제로 되는 것은 중부하시기이므로 (6)식과 (7)식의 송출기준전압 V_{ref} 는 본래 계통의 중부하시의 송출기준전압으로 바꾸어 계산한다. 또한, 역률각 θ_G 는 DGS가 지상역률의 경우 정(+), 진상역률의 경우 부(-)로 된다.

3.2 DGS의 도입한계량 산출

중부하시의 송출기준전압저하의 허용한도 $\Delta V_{ref,max}$ 를 0.005 p.u., 0.01 p.u., 0.015 p.u.로 하여 모델계통인 그림2의 주변압기 이하의 배전선에 도입가능한 DGS의 운전역률별 도입한계량 $P_{G,max}$ 를 제안된 (6)식으로 계산한 결과를 그림8에 제시한다. 또한, 지상 0.9, 1.0, 진상 0.9의 운전역률에 있어서 DGS의 도입한계량을 수치적으로 나타낸 것이 표1이다.

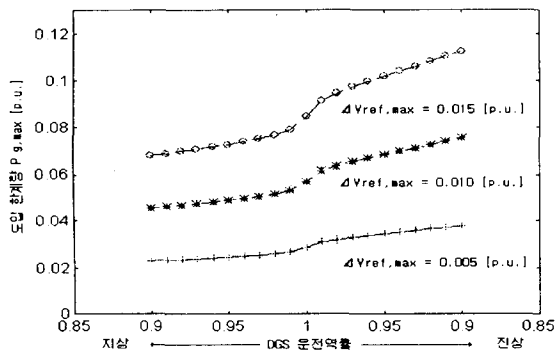


그림 8 송출기준전압저하의 허용한도, DGS운전역률, DGS 도입한계량과의 관계

Fig. 8 Relationships among the allowance variations of the sending-end reference voltage, the operating power factor and introduction limit of DGS

표2는 송출기준전압저하의 허용한도에 의해 산출된 표1의 도입한계량의 DGS가 그림2에 제시한 모델 배전계통의 피더1의 노드1 또는 노드50에 각각 도입된 경우에 대하여 각각 LDC의 동작을 시뮬레이션함으로써 얻어진 송출기준전압의 저하값이다. LDC동작의 시뮬레이션에 의해 얻어진 송출기준전압의 저하값들은 도입한계량의 산출시 조건으로 주어진 송출기준전압저하의 허용한도 $\Delta V_{ref,max}$ (0.005 p.u., 0.01 p.u., 0.015 p.u.)와 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 등가축약모델에 의해 도입한계량 $P_G + jQ_G$ 를 근사적으로 산출하는 식(6)과 식(7)의 타당성이 입증되고 있음을 알 수가 있다.

4. 도입한계량산출결과의 비교분석을 통한 복합배전계통의 운용방안고찰

표 1 DGS 도입한계량의 계산결과

Table 1 Calculated values of introduction limit of DGS

$\Delta V_{ref,max}$ [p.u.]	운전역률별 도입한계량 P_G [p.u.]		
	지상 0.9	1.0	진상 0.9
0.005	0.02287	0.02851	0.03786
0.010	0.04553	0.05675	0.07536
0.015	0.06797	0.08473	0.11252

표 2 계산된 DGS 도입한계량이 feeder 1의 node 1 또는 node 50에 도입될 경우의 송출기준전압의 저하량

Table 2 Sending-end reference voltage drop obtained through simulation of LDC operation when the calculated introduction limit of DGS is introduced into the node 1 or node 50 of feeder 1

DGS운전역률	DGS도입한계량 P_G [p.u.]	DGS가 도입된 feeder 1의 node번호	
		node1	node 50
지상 0.9	0.02287	0.00506	0.00534
	0.04553	0.01007	0.01004
	0.06797	0.01502	0.01531
1.0	0.02851	0.00502	0.00528
	0.05675	0.00999	0.01028
	0.08473	0.01492	0.01499
진상 0.9	0.03786	0.00496	0.00508
	0.07536	0.00987	0.00956
	0.11252	0.01445	0.01473

4.1 22.9kV급 배전계통과 6.6kV급 배전계통에 도입되는 분산형전원의 도입한계량산출결과의 비교·분석

본 논문에서 22.9kV 배전계통에 대하여 분산형전원의 도입한계량을 산출한 결과인 그림8과 표1, 그리고 6.6kV 배전계통에 대하여 분산형전원의 도입한계량을 산출한 결과인 참고문헌[7]의 그림8과 표1을 비교·분석한 결과는 다음과 같이 요약될 수 있었다.

가. 22.9kV 배전계통과 6.6kV 배전계통의 양쪽 모두에 있어서, 송출기준전압저하의 허용한도를 일정하게 할 경우, DGS의 운전역률이 지상으로부터 진상으로 갈수록 DGS의 도입한계량이 증가하였다. 그 이유는 DGS의 운전역률이 진상으로 갈수록 DGS가 무효전력을 계통으로부터 공급받게 되어 LDC가 센싱하는 주변압기 2차측전류를 증가시키는 방향으로 작용하는 만큼 DGS의 도입량 P_G 가 증가하기 때문이다. 반대로 진상에서 지상으로 갈수록 감소하였다. 그 이유는 DGS의 무효전력이 배전계통에 더욱 공급되는 형태로 되어 주변압기 2차측전류를 감소시키는 방향으로 작용하는 만큼 DGS의 도입량 P_G 가 감소하게 된다. 이것은 도입한계량의 산출식인 식(5)와 식(6)으로부터 설명될 수 있다.

나. 22.9kV 배전계통과 6.6kV 배전계통의 양쪽 모두에 있어서, 분산형전원의 운전역률을 일정하게 할 경우, 송출기준전압저하의 허용한도를 크게 할수록 도입한계량은 증가했다. 이것은 분산형전원의 도입이 송출기준전압에 미치는 영향의 분석에서 알 수 있듯이 도입량이 증가할수록 주변압기의 2차

측전류가 작아져 LDC는 이를 감지하여 송출기준전압이 낮아 지게 동작하기 때문이다.

다. 분산형전원의 도입한계량을뱅크최대부하의 크기에 대한 %로 나타내었을 때, 동일한 송출기준전압저하의 허용한도에 대한 운전역률별 도입한계량은 비슷하였다(표3). 현재 보급되고 있는 분산형전원의 일반적인 운전역률범위가 지상 0.9 ~ 진상 0.9라는 것을 고려한다면, 기존 배전계통에 도입될 수 있는 그 도입한계량은 송출기준전압저하의 허용한도 0.005, 0.1, 0.015에 대하여 각각 약 6%~10%, 12%~20%, 18%~30% 정도의 범위라는 것을 알 수 있었다.

4.2 분산형전원이 도입된 복합배전계통의 운용관리방안

22.9kV 배전계통에 대하여 분산형전원의 도입한계량을 산출한 결과와 6.6kV 배전계통에 대하여 분산형전원의 도입한계량을 산출한 결과를 비교·분석함으로써 분산형전원의 운전역률과 도입량 및 LDC내부의 정정계수에 의해 결정되는 송출기준전압사이의 일반적 상관관계를 다음과 같이 도출할 수 있었다.

- LDC에 의해 전압조정이 되는 기존의 배전계통에 분산형전원이 도입되면, 분산형전원의 운전역률과 도입량으로 인하여 LDC의 내부정정계수에 의해 결정되는 송출기준전압의 저하현상이 일어나게 되므로 LDC는 그 적정전압조정의 기능을 상실하게 된다.
- DGS의 운전역률을 진상으로 할수록 도입한계량은 커진다. 즉, 송출기준전압저하에 끼치는 영향이 작아진다.
- DGS의 운전역률을 지상으로 할수록 도입한계량은 작아진다. 즉, 송출기준전압저하에 끼치는 영향이 커진다.
- 어느 배전계통의 송출기준전압저하의 허용한도를 알면, 그 계통에 도입가능한 운전역률별 DGS의 도입한계량을 파악하는 것이 가능하다.

한편, 배전계통에 도입되는 분산형전원의 양은 그 보급단계 즉, 초기단계, 중간(활성화)단계, 성숙단계에 따라서 다르기 때문에 전술의 도출된 일반적 상관관계를 갖는 복합배전계통의 운용방안에는 분산형전원의 보급단계를 고려해 넣을 필요가 있다. 따라서, 전압조정측면에서 보았을 때, 상기의 도출된 일반적 상관관계들과 분산형전원의 보급단계를 고려한 복합배전계통의 운용방안에 대해서는,

첫째, DGS의 보급초기단계에서는 도입되는 DGS의 도입량이 그다지 많지 않으므로 DGS도입대상 계통의 송출기준전압저하의 허용한도를 파악해두고, 가능한 범위 내에서 DGS의 운전역률을 진상으로 하도록 유도한다.

둘째, 보급활성화 즉, 성숙단계로 진전되는 중간단계의 경우는, DGS가 집중적으로 어느 계통에 도입되어 도입한계량을 초과하게 될 상황 등이 발생할 수 있는 가능성이 있으므로 도입한계량을 초과한 대상뱅크이하의 고압배전선중 집중적으로 과도하게 도입된 배전선만을 분리시켜 배전자동화 등의 설비를 이용하여 리얼타임으로 송출전압을 최적하게 조정하는 전압조정방식을 채택하거나 비교적 용량이 큰 DGS와의 역률협조운전계약조건을 전제로 한 LDC전압조정방식을 적용

표 3 뱅크최대부하의 크기에 대한 비로 나타낸 DGS 도입 한계량 (P_G)

Table 3 Introduction limit of DGS represented as the ratio to the peak load of bank

역률 $\Delta V_{ref. max}$ 항목	지상 0.9			1.0			진상 0.9		
	0.5 %	1.0 %	1.5 %	0.5 %	1.0 %	1.5 %	0.5 %	1.0 %	1.5 %
6.6kV 배전계통의 경우 (뱅크최대부하 약10MW에 대한 %)	약 5.8	약 11.6	약 17.3	약 7.3	약 14.5	약 21.6	약 9.7	약 19.2	약 28.7
22.9kV 배전계통의 경우 (뱅크최대부하 약36MW에 대한 %)	약 6.4	약 12.6	약 18.9	약 7.9	약 15.8	약 23.5	약 10.5	약 20.9	약 31.3

하도록 하고, 나머지의 선로에 대해서는 보급 초기단계의 운용방안을 적용한다.

셋째, 보급성숙의 단계에서는 도입 대상배전계통의 뱅크이하에 연결된 모든 고압배전선로에 도입한계량을 초과하는 상당량의 DGS가 도입되어 있는 상황이 고려될 수 있으므로 고압배전선별로 각각 리얼타임으로 송출전압을 최적하게 조정하는 전압조정방식을 채택하거나 비교적 용량이 큰 DGS와의 역률협조운전계약조건을 전제로 한 LDC전압조정방식을 적용하도록 한다. 문제가 심각할 경우는, 고압배전선별로 리얼타임 최적송출전압조정방식과 비교적 용량이 큰 DGS와의 역률협조운전방식을 병용한다.

와 같은 결론을 얻을 수 있었다. 이를 정리하면 표4와 같다.

표 4 전압조정측면에서 본 DGS가 도입된 복합배전계통의 운용방안

Table 4 Operation methods of power distribution system with DGSs from the view point of voltage regulation

항목	운 용 방 안
초기 단계	- 기존의 뱅크일괄 LDC전압조정체제를 유지한다. - 대상계통의 송출기준전압저하의 허용한도를 파악한다. - 가능한 범위내에서 DGS의 운전역률을 진상으로 하도록 유도한다. - 도입한계량을 체크해 둔다.
중간 단계	- 도입한계량을 초과하는 계통의 경우, 뱅크이하의 고압배전선중 집중적으로 과도하게 도입된 배전선만을 분리시켜 리얼타임 최적송출전압조정방식을 채택하거나 비교적 용량이 큰 DGS와의 역률협조운전계약조건을 전제로 한 LDC전압조정방식을 적용하도록 한다. - 나머지의 선로에 대해서는 보급초기단계의 운용방안을 적용한다.
성숙 단계	- 고압배전선별로 각각 리얼타임 최적송출전압조정을 수행하거나 비교적 용량이 큰 DGS와의 역률협조운전계약조건을 전제로 한 LDC전압조정방식을 적용하도록 한다. - 문제가 심각할 경우는, 고압배전선별로 리얼타임 최적송출전압조정방식과 비교적 용량이 큰 DGS와의 역률협조운전방식을 병용한다.

5. 결 론

분산형전원이 기존의 LDC전압조정체계의 배전계통에 도입되게 되면, 분산형전원의 출력의 영향으로 인하여 배전전압을 적정하게 유지할 수 없게 될 가능성이 있다. 이에 대해 본 저자는 분산형전원의 도입이 6.6kV급 배전계통의 전압조정에 미치는 영향을 분석하고, 전압조정측면에서 본 분산형전원의 도입한계량을 결정하는 방법을 참고문헌 [7]에서 제안하였다.

본 논문에서는 분산형전원이 도입된 배전계통을 어떻게 운용해야 할까? 하는 배전계통운영자측면에서의 의문점을 해결하고자, 참고문헌[7]에 근거하여 22.9kV급 배전계통의 DGS 도입한계량을 산출하고, 그 결과를 6.6kV급 배전계통의 경우의 결과와 비교하여 분산형전원의 운전역률과 도입한계량 및 LDC내부의 정정계수에 의해 결정되는 송출기준전압사이의 일반적인 상관관계를 도출하였다.

그 상관관계의 주요 핵심은, LDC에 의해 전압조정되는 배전계통의 경우, DGS의 운전역률을 진상으로 할수록 도입한계량은 커진다는 것과 그 계통의 송출기준전압저하의 허용한도를 알면, 그 계통에 도입가능한 운전역률별 DGS의 도입한계량을 파악하는 것이 가능하다는 것이다. 이로부터 복합배전계통 운용방안을 고찰한 결과, DGS보급 초기단계에서는 DGS도입대상 계통의 송출기준전압저하의 허용한도파악과 DGS의 진상역률운전, 성숙단계로 진전되는 중간단계에서는 DGS가 집중적으로 과도하게 도입된 배전선에 대한 리얼타임 송출전압조정방식 및 DGS와의 역률협조운전계약조건을 전제로 한 LDC전압조정방식의 적용, 보급성숙의 단계에서는 모든 고압배전선에 대한 리얼타임 송출전압조정방식 및 DGS와의 역률협조운전계약조건을 전제로 한 LDC전압조정방식의 적용이 바람직하다는 결론을 도출할 수 있었다.

본 논문은 충북대학교 발전기금재단의 학술연구비(신진교수연구비)에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

[1] Harold Kirkham and John Klein: "Dispersed Storage and Generation Impacts on Energy Management Systems", IEEE Transac. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No.2, pp. 339-345, 1983.
 [2] Roger C. Dugan, et al.: "Harmonics and Reactive Power from Line-commutated Inverter in Proposed Photovoltaic subdivision", IEEE Transac. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No.9, pp. 3205-3211, 1983.
 [3] H.Kirham and R. Das: "Effects of Voltage Control in Utility Interactive Dispersed Storage and Generation Systems", IEEE Transac. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No.8, pp. 2277-2282, 1984.
 [4] R. C. Dugan and S. A. Thomas and D. T. Rizy:

"Integrating Dispersed Storage and Generation with an Automated Distribution System", IEEE Transac. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No.6, pp. 1142-1146, 1985.

[5] D. T. Rizy and W. T. Jewell and J. P. Stovall: "Operational and Design Considerations for Electric Distribution Systems with Dispersed Storage and Generation", IEEE Transac. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No.10, pp. 2684-2871, 1985.
 [6] W. R. Prince, et al.: "Current Operating Problems Associated with Non-Utility Generation", IEEE Transac. on Power Systems, Vol.4, No. 4, pp. 1534-1541, 1989.
 [7] J. E. Kim et al.: " Methods of Determining the Introduction Limits of Dispersed Generation Systems in A Distribution System from the Viewpoint of Voltage Regulation ", IEE Japan, Trans., Vol.16-B, No.12, pp. 1461-1469, 1996
 [8] 일본 전기협동연구 제24권 제4호: "배전선의 전압조정과 관리", 1968.

저 자 소 개



김재언 (金在彦)
 1959년 7월 17일생. 1982년 한양대 공대 전기공학과 졸업, 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1984년3월1일~1998년8월31일 한국전기연구소 근무. 1996년 일본 교토대 전기공학과 졸업(공학). 배전계통운용, MW급 전지전력저장시스템 설계 및 운용, 분산형전원 계통 연계 해석 및 운용, 복합에너지시스템, 자율분산배전계통, Unbundled Power Quality Service, Custom Power Devices 등의 연구분야에 종사. 1995년도 일본 일본전기학회 전력·에너지부문대회 우수논문발표대상 수상. 현재, 충북대학교 공과대학 전기전자공학부 전임강사.

Tel : 0431-261-2423
 E-mail: jekim@trut.chungbuk.ac.kr



조성현 (曹聖鉉)
 1967년 2월 15일생. 1995년 충북대학교 전기공학과 졸업(학사). 1997년 충북대학교 대학원 졸업(석사). 1997년~현재 충북대학교 대학원 전기공학과 박사과정

Tel : 0431-261-2423
 E-mail: shcho@power.chungbuk.ac.kr