

배전계통에 도입되는 분산전원의 운전가능범위 결정에 관한 연구

論 文
51A-2-7

A Study for Determining the Permissible Operating Range of Distributed Generation interconnected into Distribution System

金 兌 應* 金 在 彦**
(Tae-Eung Kim · Jae-Eon Kim)

Abstract - This paper describes a new method for determining the permissible operating range of DG(Distributed Generation) when DG is introduced into power distribution systems of which the voltage is controlled by LDC(Line Drop Compensator). Much of the DG installed during the next millennium will be accomplished through the reconstruction of the electric power industry. But in that case, it is difficult to properly maintain the terminal voltage of low voltage customers by using only LDC. This paper presents a method for determining the permissible operating range of DG for proper voltage regulation of power distribution systems with LDC. Proposed method has been applied to a 22.9 kV model and practical distribution systems, and its result is almost identical with the simulation result.

Key Words : Distribution System, Distributed Generation, Line Drop Compensator, Voltage Regulation

1. 서 론

분산전원(Distributed Generation)이 도입되는 초기보급단계의 배전계통의 운용체계로서 고려될 수 있는 가장 기본적인 현실적인 형태는 기존의 전압운용체계를 유지하면서 분산전원의 계통연계운전을 무리 없이 수용할 수 있는 체계가 될 것이다. 그러나, 분산전원이 도입된 배전계통은 기존의 부하만이 존재하는 방사상 배전계통과는 달리 부하와 전원이 혼재되어 운용되는 루프 형태로 되기 때문에 단방향 전력조류만을 고려한 기존의 LDC(Line Drop Compensator) 전압조정체계하의 배전계통에 분산전원이 도입될 경우 전력품질유지 즉, 수용가의 적정전압유지가 어렵게 된다[1][2].

이 해결 방법중의 하나로서 기존의 LDC 전압조정체계를 유지할 수 있도록 분산전원의 도입한계량을 구하여 그 도입량을 유지하는 방법이 고려될 수 있다[3]. 또 다른 방법은 기존의 LDC 전압조정체계를 유지할 수 있는 분산전원의 운전가능범위를 결정하여두고 그 범위내에서 운전하고자 하는 방법이 고려될 수 있다.

본 논문에서는 후자의 방법, 즉 LDC 전압조정체계를 유지할 수 있는 분산전원의 운전가능범위를 결정하는 방법을 제안하고, 이를 실제의 22.9kV급 배전계통에 적용하여 그 타당성을 입증하기로 한다.

2. LDC 전압조정방식의 22.9kV급 배전계통 모델선정 및 분산전원 도입에 따른 영향분석

본 장에서는 LDC에 의해 전압이 조정되고 있는 22.9kV급 배전계통을 실제에 가까운 모델로 선정하여 분산전원의 도입이 배전계통 전압조정에 미치는 영향을 분석하기로 한다.

2.1 LDC 전압조정용 모델배전계통

분산전원이 LDC전압조정방식에 의해 전압조정되고 있는 기존의 배전계통에 연계되었을 경우의 전압변동영향을 분석하기 위한 모델배전계통은 주변압기 용량 45/60MVA, 배전선로의 기준용량은 100MVA, 기준전압은 22.9kV로 하였다. 각각의 피더는 용량이 10MVA이며, 피더 1은 농촌 및 주거지역을 피더 2는 도시상업지역을 피더 3은 공장지역을 그리고 피더 4는 혼합되어 있는 지역을 모델 계통으로 선정하였다. 이 계통의 특징을 하기에 상세히 기술한다.

- 주변압기의 1차측 전압 : $1.0 \angle 0^\circ$
- Base MVA = 100MVA, Base kV = 22.9kV
- 주변압기의 임피던스 $Z = j0.333$ p.u.
- 배전선로의 임피던스 $Z = 0.0347 + j0.0746$ p.u./km
- 중부하시 주상변압기의 평균전압강하 : 2%
- 경부하시 주상변압기의 평균전압강하 : 0.5%
- 중부하시 저압배전선의 평균전압강하 : 6%
- 경부하시 저압배전선의 평균전압강하 : 1.5%
- 중부하시 수용가 인입선 평균전압강하 : 2%
- 경부하시 수용가 인입선 평균전압강하 : 0.5%
- 주상변압기의 5% Tap 비 : 13200:230
- LCT의 탭 간격 : 0.01 p.u.

* 正 會 員 : 忠 北 大 大 學 院 電 氣 工 學 科 博 士 課 程

** 正 會 員 : 忠 北 大 電 氣 電 子 工 學 部 助 教 授 · 工 博

接 受 日 字 : 2001 年 11 月 14 日

最 終 完 了 : 2002 年 01 月 16 日

- 저압수용가 단자전압 허용범위 : 207V~233V
- 중부하시 고압측으로 환산한 저압수용가 단자전압의 허용범위 : 22863V~24075V
- 경부하시 고압측으로 환산한 저압수용가 단자전압의 허용범위 : 21148V~23390V

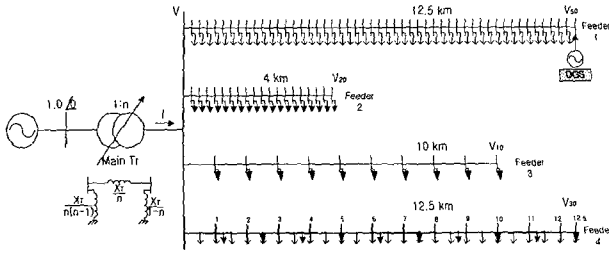


그림 1 모델 배전계통
Fig. 1 Model distribution system

그림 1과 같은 모델배전계통에 있어서, 중부하시 최대부하 전류 및 부하역률, 그리고 경부하시의 최소부하전류는 각각 $I_{max}=0.38747$ p.u., $\cos \theta_{max}=0.89208$, $I_{min}=0.09198$ p.u.로 되어, 이 때의 $V_{spo,max}=1.09637$ p.u., $V_{spomin}=1.00801$ p.u.로 구해졌다. 이것을 기본 데이터로 하여 참고문헌[1]의 식(2)~(4)에 의거하여 산출된 LDC내부의 셋팅계수는 각각 $R=0.16365$, $X=0.08288$, $V_0=0.97245$ 이다.

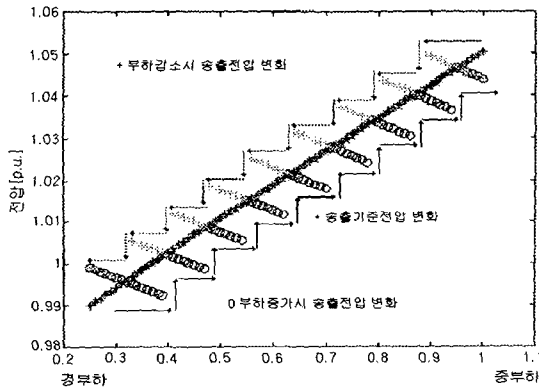
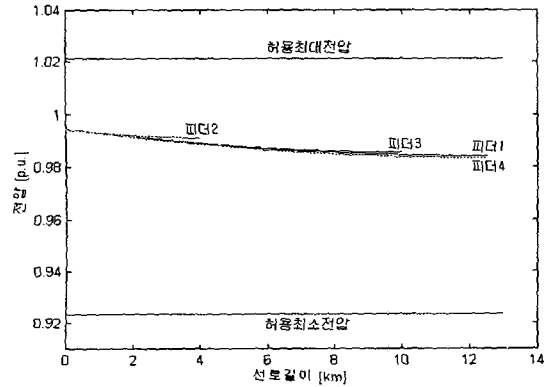


그림 2 분산전원이 도입되지 않은 경우의 송출기준전압 및 송출전압의 변화
Fig. 2 Behavior of sending-end reference voltage of LDC and sending-end voltage in model distribution system without DG

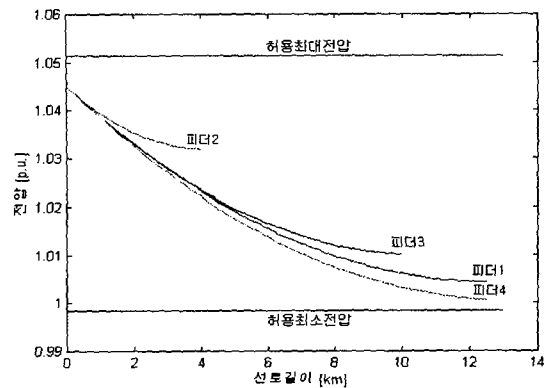
분산전원의 도입이 고려되지 않은 본래의 배전계통에 있어서 부하가 경부하에서 중부하로 그리고 중부하에서 경부하로 변화해 갈 때의 송출기준전압변화와 송출전압변화에 대한 동작특성을 그림 2에서 보여주고 있다. 그림 2에서 세로축은 전압의 크기, 가로축은 최대부하를 1.0으로 정규화한 부하값을 나타내며, 주변압기의 송출전압은 송출기준전압을 중심으로 하여 LDC 장치내부의 전압비교기의 동작불감대 ± 0.01 p.u.내로 조정되고 있다.

그림 2에서 알 수 있듯이 부하의 증감은 LCT의 탭 위치

가 바뀌기 전이라도 주변압기 내부임피던스에 의해 주변압기 2차측 전압의 증감을 초래한다. 따라서, 부하가 증가시인가 아니면 감소시인가에 따라 같은 부하의 상태라 할지라도 LCT의 탭 위치가 다를 수 있다.



(a) 경부하시



(b) 중부하시

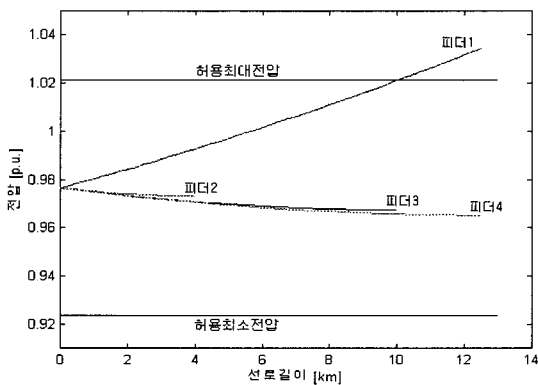
그림 3 분산전원이 도입되지 않은 경우의 선로전압
Fig. 3 Voltage profile in model distribution system without DG

그림 3은 분산전원이 도입되지 않은 모델배전계통의 경부하시 및 중부하시의 배전선로 전압특성곡선을 나타낸다. 그림 3에서 가로축은 선로의 길이를 나타내며, 세로축은 전압의 크기를 나타낸다. 그림에서 모델배전계통은 수용가 단자전압 유지의 허용범위 207V~233V를 고려한 중부하시 고압배전선의 유지범위 0.9984 p.u~1.0513 p.u., 경부하시 고압배전선의 유지범위 0.9235 p.u~1.0214 p.u.를 모두 만족하고 있다. 따라서 선정된 모델 배전계통은 수용가 단자전압의 허용범위를 잘 유지할 수 있도록 전압조정이 이루어짐을 알 수 있다.

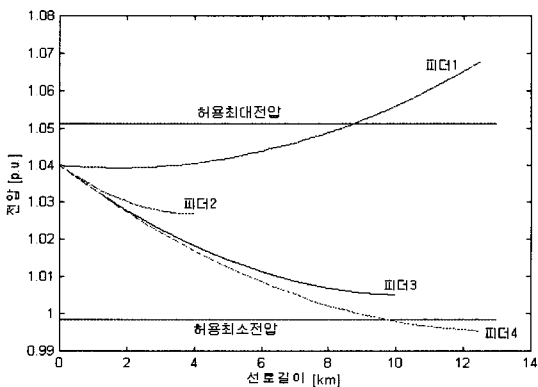
2.2 분산전원의 도입이 기존배전계통의 전압조정에 미치는 영향 분석

분산전원의 도입이 기존배전계통에 미치는 영향을 분석하기 위하여 경부하시 및 중부하시에 각각 피더 1의 말단노드에 지상역률 0.9로 운전하는 9MVA 분산전원을 도입하였다.

배전계통에 분산전원이 도입된 경우의 전압변동영향을 살펴보면, 배전계통에 분산전원이 도입됨으로써 주변압기 2차측의 부하전류가 감소되어 송출기준전압이 저하하여, 결국 LDC동작특성에 의해 송출전압이 저하하게 되고, 선로말단부에 위치하여 있는 저압수용가 일수록 그 단자전압이 적정유지범위를 벗어나게 될 가능성이 높다. 또한, 분산전원이 도입된 선로에서는 역조류가 흘러 분산전원이 도입된 선로에 위치한 저압수용가의 전압이 상승하여 전압허용범위를 벗어날 가능성이 높다.



(a) 경부하시



(b) 중부하시

그림 4 분산전원이 도입된 배전계통의 선로전압

Fig. 4 Voltage profiles in model distribution system with DG

이러한 현상은 전압유지 허용범위의 여유가 있는 경부하시보다는 그 여유가 적은 중부하시에 송출전압의 변화로 인해 저전압 또는 과전압 수용가가 발생한다는 것을 알 수 있었다. 이 때 도입되는 분산전원의 운전역률도 진상보다는 지상의 경우가 그 영향이 더욱 두드러지게 나타난다는 것을 알 수 있었다.

이를 요약하여 기술하면 다음과 같다.

- i) LDC에 의해 전압조정이 되는 기존의 배전계통에 분산전원이 도입되면, 분산전원의 운전역률과 도입량으로 인하여 LDC의 내부정정계수에 의해 결정되는 송출기준전압

의 지하현상이 일어나게 되므로 LDC는 그 적정전압유지의 기능을 상실하게 된다

- ii) 분산전원의 운전역률을 진상으로 할수록 송출기준전압저하에 끼치는 영향이 작아진다.
- iii) 분산전원의 운전역률을 지상으로 할수록 송출기준전압저하에 끼치는 영향이 커진다.

3. 분산전원의 운전가능범위 결정 방법

분산전원이 도입된 배전계통의 전압변동 원인은, 주변압기의 동작, 주변압기 임피던스에 의한 전압변동, 선로임피던스에 의한 전압변동이라는 분석결과에 근거하여, 분산전원의 배전계통도입시 도입대상 배전계통의 적정전압조정에 영향을 미치지 않기 위해서 중부하시에 만족해야할 조건은 다음과 같다.

조건 1 : 변전소 주변압기의 탭이 동작하지 않을 것.

경부하의 경우는 분산전원이 도입되어 주변압기의 탭이 동작하더라도 주변압기 이하의 선로의 전압프로파일이 전압적정유지범위의 상한치 및 하한치까지는 그 여유가 충분히 있지만, 중부하(피크부하)의 경우는 그 상한 및 하한여유가 별로 없어(일반적으로 1%이하, 탭간격은 일반적으로 1~1.5% 정도임) 탭이 동작하게 되면 전압적정유지범위를 벗어나게 될 가능성이 높다. 따라서, 최악의 경우를 고려한다면 중부하시기를 기준으로 하여 주변압기의 탭이 동작하지 않는 것으로 하는 것이 타당하다.

조건 2 : 분산전원이 도입되지 않는 모든 선로에서의 전압이 전압허용범위를 만족할 것.

주변압기의 탭이 동작하지 않더라도 분산전원의 출력(유효 및 무효전력)으로 인하여 주변압기 임피던스에 의한 전압변동이 발생하고, 주변압기 임피던스에 의한 전압변동은 모든 선로의 전압에 영향을 미치게 된다. 따라서, 분산전원이 도입되지 않는 모든 선로의 전압이 전압허용범위를 만족하여야만 한다.

조건 3 : 분산전원이 도입되는 선로에서의 전압이 전압허용범위를 만족할 것.

분산전원이 도입되는 지점에서는 분산전원의 도입이 하나의 새로운 전력공급원이 도입되는 것으로 이 지점의 전압은 분산전원의 운전역률에 따라 크게 상승 또는 하강 할 수 있다. 따라서, 분산전원이 도입되는 선로에 대해서는 선로에서의 전압변동량 및 분산전원이 도입된 지점에서의 전압변동량이 고려되어야만 한다. 즉, 분산전원이 도입된 피더에서의 모든 선로전압이 전압허용범위를 만족하여야만 한다.

조건 4 : 도입되는 분산전원의 출력량이 선로설비용량을 초과하지 말 것.

한 피더의 임의의 여러 지점 또는 어느 한 지점에 분산전원이 도입될 때 한 피더에 도입되는 분산전원의 전체 출력량의 합은 계통의 설비특성상 설정되어있는 설비용

량을 초과하여 도입 될 수 없다. 따라서, 하나의 피더에 도입되는 각각의 분산전원 출력량의 합은 선로설비용량을 초과 할 수 없다.

본 장에서는 기존 배전계통의 적정전압조정이 유지될 수 있는 상기조건을 분산전원 출력과 연관해서 이들의 관계조건을 도출하여 분산전원의 운전가능범위를 결정하는 방법에 대하여 기술하기로 한다.

3.1 분산전원의 운전가능범위와 주변압기 탭 동작과의 제약조건(조건 1)

분산전원의 운전가능범위와 주변압기 탭 동작과의 관계조건을 도출하기 위하여 그림 1의 모델배전계통에 있어서 다음과 같이 변수를 정의한다.

- P_{0j}, Q_{0j} : 변전소에서 j 번째 피더로 송출되는 유효, 무효 전력
- $P_{Gi,j}, Q_{Gi,j}$: j 번째 피더의 i 번째 노드에 도입되는 분산전원의 유효·무효전력
- $P_{00} = \sum P_{0j}, Q_{00} = \sum Q_{0j}$
- $P_{GT} = \sum P_{Gi,j}, Q_{GT} = \sum Q_{Gi,j}$
- V : $P_{00}+jQ_{00}$ 에 대한 변전소 2차측 모선에서의 전압 크기

LDC의 전압조정 방식은 주변압기 이하에 연결되어있는 다수의 부하를 하나의 가상부하중심점에 집중적으로 연결되어있는 것으로 가정하여, 정상상태 운전조건하에서 모든 수용가의 전압이 전압허용범위내에 존재하도록 주변압기 2차측으로부터 가상부하중심점까지의 등가임피던스 및 가상부하중심점의 전압을 산출하고, 이것을 LDC의 설정계수로 한다. 그림 1에서 주변압기에서 피더로 송출되는 유효 및 무효전력을 P_{00} 및 Q_{00} 라 하고, 부하중심점의 전압을 V_c 라 하면, 그림 1의 모델배전계통은 다음과 같이 LDC 전압조정을 위한 등가축약 모델로 바꿀수 있다.

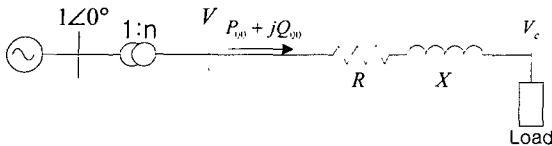


그림 5 LDC 전압조정을 위한 분산전원이 도입된 그림 1의 등가축약모델
Fig. 5 Equivalent model of Fig. 1 with DG for LDC voltage regulation

그림 5에서 R과 X는 주변압기 2차측에서부터 가상부하중심점까지의 등가임피던스를 의미하며, 이것을 LDC의 설정계수로 사용된다. 즉, LDC 전압조정방식은 부하의 변동에 따라 가변하는 부하중심점에서의 전압값 V_c 를 LDC의 가상부하중심점 값인 V_0 에 맞추어지도록 탭 조정을 수행한다. 이것은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$-0.01 \leq V_c - V_0 \leq +0.01 \quad (1)$$

식 (1)에서 V_c 는 가상부하중심점의 전압으로써, 이것은 주변압기 2차측의 전압에서 가상부하중심점까지의 전압강하를 뺀 것과 같다. 따라서, 분산전원이 도입되기 전의 LDC의 운전특성으로부터 아래의 부등식이 만족되어야만 한다[4],[5].

$$V_0 - 0.01 \leq \sqrt{V^2 - 2(RP_{00} + XQ_{00}) + (R^2 + X^2)(P_{00}^2 + Q_{00}^2)/V^2} \leq V_0 + 0.01 \quad (2)$$

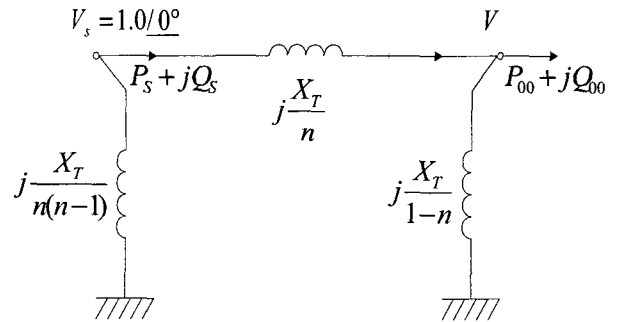
단위법으로 표현하면, V는 1.0에 가깝고, $-2(RP_{00}+XQ_{00})$ 는 $(R^2+X^2)(P_{00}^2+Q_{00}^2)/V^2$ 에 비해 매우 크므로 식(2)는 식(3)과 같이 간략화 될 수 있다.

$$V_0 - 0.01 \leq \sqrt{V^2 - 2(RP_{00} + XQ_{00})} \leq V_0 + 0.01 \quad (3)$$

한편, 분산전원이 주변압기이하의 배전선로에 분산적으로 다수 도입된 경우, 분산전원의 도입에 따른 선로손실변화량은 무시할 수 있을 정도로 매우 작기 때문에, 이를 무시하면, 주변압기 2차측에서의 송출되는 유효 및 무효전력은 각각 $P_{00}-P_{GT}$ 및 $Q_{00}-Q_{GT}$ 로 표현이 가능하다. 이 경우, 분산전원의 도입으로 인한 주변압기에서의 전압변화량을 ΔV 라 한다면, LDC에 의한 주변압기탭이 동작하지 않기 위해서는 상기 식 (3)에 근거하여 아래의 부등식이 만족되어야만 한다.

$$V_0 - 0.01 \leq \sqrt{(V^2 + \Delta V^2) - 2(R(P_{00} - P_{GT}) + X(Q_{00} - Q_{GT}))} \leq V_0 + 0.01 \quad (4)$$

식(4)에서, 주변압기에서의 전압변화량 ΔV^2 은 그림 6의 주변압기 등가모델로부터 식 (5)와 같이 구할 수 있다.



V_s : 주변압기 1차전압, V : 주변압기 2차전압
 X_T : 주변압기 임피이던스, n : 주변압기 탭 값

그림 6 주변압기 등가모델
Fig. 6 Equivalent model of Main Transformer

$$\Delta V^2 = \frac{2P_{00}P_{GT} + 2\left(Q_{00} + \frac{V^2}{X_T}\right)Q_{GT}}{2\left(Q_{00} + \frac{V^2}{X_T}\right)\frac{1}{X_T} - \left(\frac{n}{X_T}\right)^2} \quad (5)$$

3.2 분산전원이 도입되지 않는 선로에 대한 분산전원의 출력량 제약조건(조건 2)

분산전원이 기존의 배전계통에 도입되면 분산전원의 출력

에 의해 주변압기 임피던스에 의한 전압변화(강하 또는 상승)와 선로임피던스에 의한 전압변화가 발생하게 된다. 따라서 분산전원이 도입되지 않는 선로에 대한 전압변동과 분산전원이 도입되는 선로에 대한 전압변동을 고려할 필요가 있다.

먼저, 주변압기 임피던스에 의한 전압변화는 주변압기 이하에 연결되어있는 모든 선로의 전압프로파일을 주변압기2차측에서의 전압변화량과 거의 같은 크기로 선형적으로 강하 혹은 상승을 하게 되므로, 주변압기 이하의 분산전원이 도입되지 않은 배전선로들 중에서 전압강하가 제일 심한 선로를 선택하여 분산전원의 출력량과 전압허용범위와의 관계조건을 도출해야 할 필요가 있다.

기존의 배전계통에 분산전원이 도입 될 때 주변압기 임피던스에 의한 전압변화량을 고려하기 위해서 그림 7에서와 같이 분산전원이 도입되지 않는 배전선로 중 전압강하가 제일 심한 선로의 전압프로파일과 적정전압유지 상한치 및 하한치와의 차 즉, 상한여유($VH^2 - V_{max}^2$) 및 하한여유($V_{min}^2 - VL^2$)를 산출하였으며, 주변압기 임피던스에 의한 전압변동량은 이들 여유값보다 작아야만 한다. 이 관계를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\Delta V^2 > 0 \text{ 일 때, } \Delta V^2 < VH^2 - V_{max}^2 \quad (6)$$

$$\Delta V^2 < 0 \text{ 일 때, } -\Delta V^2 < V_{min}^2 - VL^2 \quad (7)$$

여기서,

- ΔV : 주변압기 임피던스에 의한 전압변화(전압강하 또는 전압상승)
- VH : 중부하시 적정전압유지범위의 최대허용전압
- VL : 중부하시 적정전압유지범위의 최저허용전압
- V_{max} : 중부하시 선로에서의 최대전압
- V_{min} : 중부하시 분산전원이 도입되지 않는 배전선로에서의 최저전압

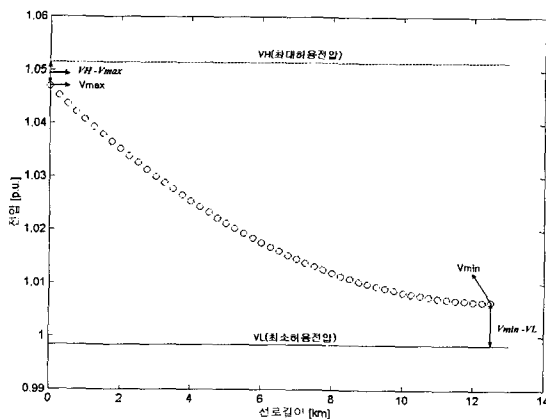


그림 7 분산전원의 출력량과 전압허용범위와의 관계
Fig. 7 Relation of DG output and Permissible Voltage Limit

3.3 분산전원이 도입되는 선로에 대한 분산전원의 출력량 제약조건(조건 3)

분산전원이 도입되는 선로에 대해서는 선로에서의 전압변동량 및 분산전원이 도입된 지점에서의 전압변동량이 고려되어야만 한다. 주변압기 임피던스에 의한 전압변화량(ΔV)과 주변압기2차측 직하부터 분산전원 연계점까지의 선로임피던스에 의한 전압변화량(ΔV_G)을 고려해야하므로, 분산전원이 도입되기 전 선로에서의 말단전압을 V_{end} 라 하면, 분산전원이 도입된 후의 선로말단전압은 주상변압기의 전압강하, 저압배전선의 전압강하를 고려한 다음 식을 만족해야 한다.

$$VL \leq \sqrt{V_{end}^2 + \Delta V^2 + \Delta V_G^2} \leq VH \quad (8)$$

여기서, 주변압기2차측 직하부터 분산전원 연계점까지의 선로임피던스에 의한 전압변화량(ΔV_G)은 분산전원이 선로말단에 도입되는 경우가 제일 크므로, 분산전원이 선로말단에 도입되는 것으로 하는 것이 타당하다. 따라서, 선로말단에 도입되는 분산전원의 출력용량을 $S_G = P_G + jQ_G$ 라 하면, 중부하시 선로말단의 전압변화계수(일정)를 이용하여 선로말단에서의 선로임피던스에 의한 전압변화량은 다음과 같이 근사적으로 구할 수 있다.

$$\Delta V_G^2 = \frac{\partial V_{end}^2}{\partial P_G} P_G + \frac{\partial V_{end}^2}{\partial Q_G} Q_G \quad (9)$$

여기서, $\partial V_{end}^2 / \partial P_G > 0$, $\partial V_{end}^2 / \partial Q_G > 0$ 이다. 왜냐하면, 분산전원이 도입된다는 것은 부하가 감소하는 것을 의미하기 때문이다.

한편, 식(8)을 분산전원의 운전역률이 지상 및 진상인 경우로 나누어 분석해 보기로 하자.

먼저, 지상의 경우(ΔV^2 에 관한 식(5)의 $P_{GT} \geq 0$, $Q_{GT} \geq 0$ 및 ΔV_G^2 에 관한 식(9)의 $P_G \geq 0$, $Q_G \geq 0$), $\Delta V^2 \geq 0$, $\Delta V_G^2 \geq 0$ 이고, 본래의 대상선로가 $VL^2 \leq V_{end}^2$ 이므로 $VL^2 \leq V_{end}^2 + \Delta V^2 + \Delta V_G^2$ 은 항상 성립한다. 또한, 선로말단에 분산전원이 도입되더라도 $V_{end}^2 + \Delta V_G^2 < V_{max}^2$ 이 만족되고 식(6)인 $\Delta V^2 \leq VH^2 - V_{max}^2$ 이 만족되면 $V_{end}^2 + \Delta V^2 + \Delta V_G^2 \leq VH^2$ 은 항상 성립한다.

$$\frac{\partial V_{end}^2}{\partial P_G} P_G + \frac{\partial V_{end}^2}{\partial Q_G} Q_G \leq V_{max}^2 - V_{end}^2 \quad (10)$$

다음, 진상의 경우(ΔV^2 에 관한 식(4)의 $P_{GT} > 0$, $Q_{GT} < 0$ 및 ΔV_G^2 에 관한 식(9)의 $P_G > 0$, $Q_G < 0$)를 살펴보면, ΔV^2 및 ΔV_G^2 은 지상의 경우에 비하여 작고, 더욱 진상으로 갈수록 0보다 작게 되므로 $V_{end}^2 + \Delta V^2 + \Delta V_G^2 \leq VH^2$ 은 항상 성립한다. 그리고, $VL^2 \leq V_{end}^2 + \Delta V^2 + \Delta V_G^2$ 은 $0 \leq V_{end}^2 - VL^2 + \Delta V_G^2 + \Delta V^2$ 로 변형시킬 수 있다. 이것으로부터 식 (11)을 유도할 수 있다.

$$VL^2 - V_{end}^2 \leq \Delta V^2 + \Delta V_G^2 \quad (11)$$

즉, 지상에 대해서는 식(10)을 만족하여야 하고, 진상에 대해서는 식(11)을 만족하여야 한다.

3.4 분산전원이 도입되는 선로에 대한 최대설비용량 제약조건(조건 4)

위에서 언급한 모든 제약조건은 주변압기에서 인출되는 선로들 중 한 선로에 대해 적용되는 것이다. 실배전계통에서는 계통의 안정적인 운영을 위해 설정된 설비용량 이내로 부하의 설비를 제한하고 있다. 따라서, 하나의 피더에 도입되는 분산전원의 총운전용량(S_{GT})은 각 배전선로에 설정되어있는 최대설비용량(S_E)보다 작아야 한다.

$$S_{GT} \leq S_E \quad (12)$$

여기서,

- S_{GT} : 하나의 피더에 도입되는 분산전원의 총운전용량
- S_E : 피더의 선로설비용량

3.5 분산전원의 운전가능범위 산출 알고리즘

위에서 기존의 LDC로 전압조정이 되고 있는 배전계통에 분산전원이 도입될 경우, 그 적정전압이 유지될 수 있는 분산전원의 출력량에 대한 관계조건들을 도출한 결과에 근거하여, 분산전원의 운전가능범위는 네가지 조건을 모두 만족하여야만 한다는 것을 알 수 있다. 즉, 분산전원의 유효전력과 무효전력을 변수로 하여 그 운전가능범위를 구할 경우, 식(4)∩식(6)∩식(7)∩{식(10)∪식(11)}∩식(12)를 만족하는 P_{GT} 및 Q_{GT} 의 범위를 구하여 이들을 분산전원의 운전가능범위로 하던 된다.

분산전원의 운전가능범위를 산출하기 위하여 먼저, 분산전원 도입대상 배전계통의 주변압기 이하에 대하여 다음의 관련 데이터를 파악한다.

- 변전소 송출 유·무효전력량(P_{00}, Q_{00})
- 주변압기 2차측 전압, 임피던스, 탭값(V, X_T, n)
- LDC의 정정계수(R, X, V_0) 및 Band width
- 중부하시 고압측으로 환산한 저압수용가 적정전압유지 범위의 상한치(VH) 및 하한치(VL)
- 중부하시 각 선로에서의 최대 및 최저전압(V_{max}, V_{min})
- 선로말단지점에서의 유효 및 무효전력에 대한 전압변화량($\partial V_{end}^2 / \partial P_G, \partial V_{end}^2 / \partial Q_G$)
- 선로설비용량(S_E)

도입대상 배전계통 주변압기 이하의 관련데이터를 파악한 후에 저자에 의해 제안된 수식적 방법을 이용한 분산전원 운전가능범위 산출 알고리즘은 다음과 같다.

분산전원 운전가능범위 산출 알고리즘

- Step 1. 도입대상 배전계통을 선정한다.
- Step 2. 관련 데이터를 파악한다.
- Step 3. 각각의 조건식(식(4),식(6),식(7),식(10),식(11),식(12))에 대한 부등식을 산출한다.
- Step 4. 모든 부등식의 공통범위를 산출한다.

4. 제안된 알고리즘에 대한 모델배전계통 및 실배전계통에의 고찰

제안된 분산전원의 운전가능범위 결정 방법의 타당성을 증명하기 위하여 모델배전계통 및 실배전계통에 대한 분산전원의 운전가능범위를 산출하여보기로 한다. 분산전원의 운전가능범위를 산출할 경우 선로에서의 전압강하가 가장 심한선로에 분산전원이 도입되는 경우와 다른 선로에 분산전원이 도입될 경우로 분리해서 산출할 필요가 있다. 또한, 피더의 말단에서 전압변동이 가장 심하므로 말단에 도입되는 경우에 대하여 분산전원의 운전가능범위를 산출한다면 모든 위치에 대하여 분산전원의 운전가능범위를 만족시킬 것이다.

4.1 모델배전계통에 대한 분산전원 운전가능범위 산출

분산전원 운전가능범위를 산출하기 위한 모델배전계통의 초기조건으로서는 수용가 단자전압 유지의 허용범위 207V~233V를 고려한 중부하시 고압배전선의 유지범위는 0.9984p.u.~1.0513p.u., 주변압기의 내부 임피던스는 j0.333 p.u.로 설정하였으며, LDC내부의 셋팅계수는 $R=0.1636, X=0.0829, V_0=0.9725$ 로 산출되었다. 분산전원이 도입되지 않은 경우의 주변압기 2차측의 전압은 $V=1.0450$, 각 피더의 선로말단 최저전압은 각각 $V_{end,1}=1.0044, V_{end,2}=1.0319, V_{end,3}=1.0101, V_{end,4}=1.0006$ 이다. 이 때 변전소에서의 송출 유효·무효전력량 $P_{00}+jQ_{00}=0.3649+j0.1848$ 이다. 중부하시 피더 1과 피더 4의 선로말단지점에서 분산전원의 유효 및 무효전력에 대한 전압변화량은 각각 $\partial V_{end,1}^2 / \partial P_G=0.9239, \partial V_{end,1}^2 / \partial Q_G=1.8984$ 와 $\partial V_{end,4}^2 / \partial P_G=0.9431, \partial V_{end,4}^2 / \partial Q_G=1.9036$ 이다.

4.1.1 MTR Bank 주변압기 2차측 직하에 도입

MTR Bank 주변압기 2차측 직하에 도입되는 분산전원의 운전가능범위를 산출하기 위하여, 위와 같은 초기조건을 식(4),(6),(7) 및 (12)에 대입한 결과 다음과 같은 관계식 (13)~(15)를 도출하였다.

$$-0.039 - 2.188 \cdot Q_{GT} \leq P_{GT} \leq 0.058 - 2.188 \cdot Q_{GT} \quad (13)$$

$$-0.059 - 9.484 \cdot Q_{GT} \leq P_{GT} \leq 0.179 - 9.484 \cdot Q_{GT} \quad (14)$$

$$P_{GT} \leq \sqrt{0.1^2 - Q_{GT}^2} \quad (15)$$

여기서, 용량제약식 S_E 는 22.9kV 선로의 10MVA인 0.1 p.u.로 고려하였다.

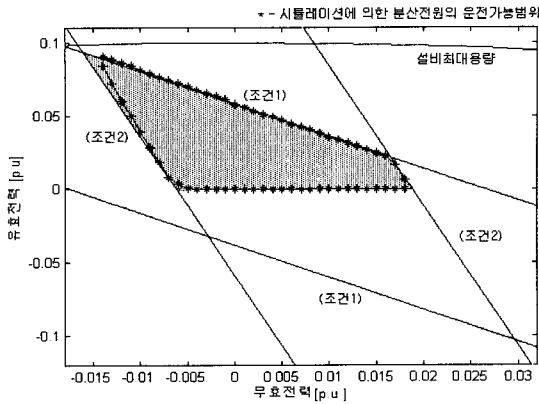


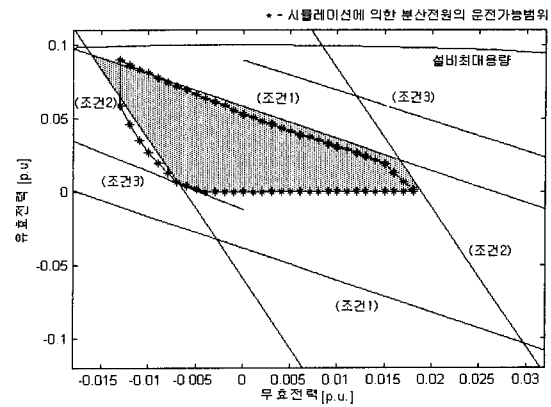
그림 8 주변압기 직하에서의 분산전원 운전가능범위
Fig. 8 Permissible operating range of DG at the Main Transformer

그림 8은 분산전원이 주변압기 2차측 직하에 도입되었을 경우에 대한 분산전원의 운전가능범위를 산출한 결과로서, 음영부분은 제안된 방법에 의해 구한 식 (13)~(15) 및 $P_G \geq 0$ (·: 발전기)으로부터 얻어진 분산전원의 운전가능범위이며, '*' 표시는 시뮬레이션을 통해 구해진 분산전원의 운전가능범위를 나타내고 있다. 직선 (조건1)은 MTR 뱅크내의 주변압기 탭이 동작하지 않을 최대, 최소 조건을 나타내며, 직선 (조건2)는 분산전원이 도입되지 않는 피더에 대한 주변압기 임피던스에 의한 전압변동량이 상하마진 허용범위를 벗어나지 않도록 하기 위한 최대, 최소 조건을 의미한다. 주변압기 2차측 직하에 분산전원이 도입되는 경우는 분산전원의 도입으로 인한 선로에서의 전압변동량이 없으므로 위의 3가지 조건만으로 분산전원의 운전가능범위를 산출할 수 있다. 제안된 방법에 의해 산출된 분산전원 운전가능범위와 시뮬레이션을 통해 산출된 분산전원의 운전가능범위는 거의 일치함을 알 수 있다.

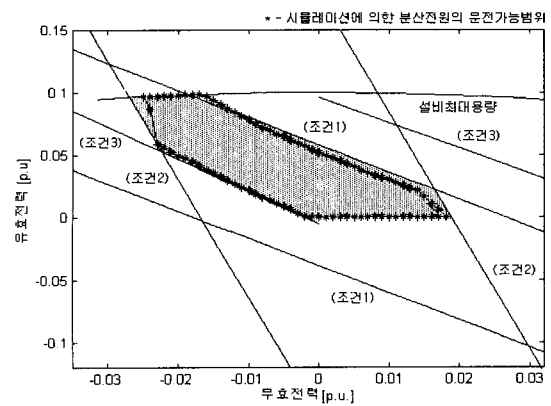
4.1.2 피더 말단에 도입

피더의 말단에 분산전원을 도입할 경우는 선로에서의 전압강하가 가장 심한 선로와 그렇지 않은 선로로 구분하여야만 한다. 모델 배전계통에서 선로전압강하가 가장 심한 선로는 피더 4이다.

만약, 분산전원이 전압강하가 가장 심한 피더 4의 말단에 도입된다면 하한마진조건은 분산전원이 도입되지 않는 선로 중 전압강하가 가장 심한 선로인 피더 1의 말단이 적용된다. 또한 다른 선로에 분산전원이 도입된다면 하한마진조건은 선로전압강하가 가장 심한 선로인 피더 4의 말단이 적용된다. 이를 이용하여 피더 1의 말단 및 피더 4의 말단에 도입되는 분산전원의 운전가능범위를 산출하면 그림 9와 같다. 그림 9에서 (a)와 (b)는 각각 모델배전계통의 피더 1과 피더 4의 말단노드에 분산전원이 도입되었을 경우 분산전원의 운전가능범위를 산출한 결과이다.



(a) 피더 1의 말단



(b) 피더 4의 말단

그림 9 피더 말단에서의 분산전원 운전가능범위
Fig. 9 Permissible operating range of DG at the end node of Feeder

위의 결과에서 피더 1의 말단에 분산전원이 도입되는 경우는 조건 2의 하한마진조건이 피더 4의 말단에 의해 결정되며, 피더 4의 말단에 분산전원이 도입되는 경우는 조건 2의 하한마진조건이 피더 1의 말단에 의해 결정된다. 또한 조건 3의 지상 및 진상에 대한 제약조건은 선로에서의 주변압기 임피던스에 의한 전압변동뿐만 아니라 선로에서의 전압변동량을 고려한 제약조건을 각각 나타낸다. 위의 결과로부터 시뮬레이션 결과와 제안된 수식적인 방법에 의한 모델배전계통의 분산전원 운전가능범위 산출결과로부터 약간의 오차는 존재하나 아주 작은 양으로 무시할 수 있는 양으로 판단된다.

4.2 실 배전계통에 대한 분산전원 운전가능범위 산출

제안된 방법에 의해 산출된 분산전원의 운전가능범위 결정 방법의 타당성을 실질적으로 증명하기 위하여 실배전계통인 서청주 변전소 #2 이하의 배전계통에 대하여 분산전원의 운전가능범위를 산출하기로 한다. 선정된 배전계통의 모델은 그림 10과 같다. 분산전원의 운전가능범위를 찾기 위한 무효전력의 범위는 -10Mvar에서 +10Mvar까지이며, 일반적으로 분산전원 운용자측은 분산전원의 유효전력 출력량에 관심이 있으므로 분산전원의 운전가능범위는 $P_G > 0$ 를 만족해야만 한다.

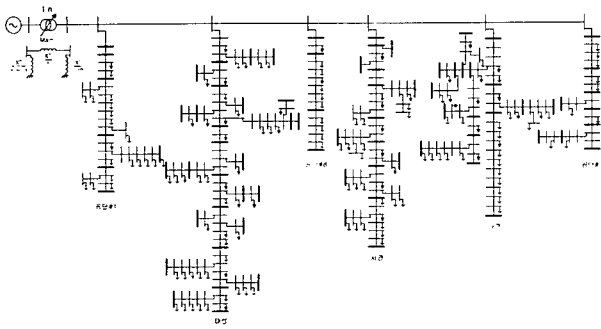


그림 10 서청주 변전소 #2 이하의 배전계통
Fig. 10 Distribution System for W. Cheong-Ju substation MTR #2

서청주 변전소 #2 이하의 배전계통에 대한 특징은 하기와 같다.

- Base MVA : 100 MVA
- Base kV : 22.9kV
- 전체 피더 개수 : 6 개
- 주 변압기 정격용량 : 45/60 MVA
- LDC의 탭 간격 및 Dead band: 0.01 p.u.
- 주변압기의 임피던스 : j0.333 p.u.

그림 10에서 MTR Bank 내의 주변압기는 내부임피던스를 고려한 조류계산을 수행하기 위하여 π 등가회로로 변환하였다. 고압측으로 환산한 저압수용가 단자전압의 허용범위는 중부하시 0.9984p.u.~1.0513p.u.이며, 경부하시 0.9235p.u.~1.0214p.u. 이다. 피더 중 전압강하가 가장 심한 선로는 말단 전압이 1.0054 p.u.인 태성구간이다.

4.2.1 가경 구간의 말단에 도입

가경 구간의 말단 노드에 분산전원이 도입될 경우 제안된 수식적인 방법을 이용하여 분산전원의 운전가능범위를 산출하면 다음과 같다.

$$-0.072 - 2.218 \cdot Q_{GT} \leq P_{GT} \leq 0.026 - 2.217 \cdot Q_{GT} \quad (16)$$

$$-0.166 - 9.031 \cdot Q_{GT} \leq P_{GT} \leq 0.224 - 9.031 \cdot Q_{GT} \quad (17)$$

$$-0.245 - 4.128 \cdot Q_{GT} \leq P_{GT} \leq 0.056 - 2.485 \cdot Q_{GT} \quad (18)$$

그림 11은 서청주 변전소 #2 이하의 배전계통의 가경 구간의 말단노드에 분산전원이 도입되었을 경우 분산전원의 운전가능범위를 산출한 결과이다. 위의 식에서 (조건1)은 탭이 동작하지 않을 상·하한 조건이며, (조건2)는 주변압기 내부임피던스 전압변동에 의한 상·하한 허용범위를 만족하기 위한 조건이다. 또한 (조건3)은 분산전원이 지상 및 진상으로 운전될 경우 주변압기 임피던스에 의한 전압변동 및 선로에서의 전압변동량을 고려한 조건을 각각 나타낸다.

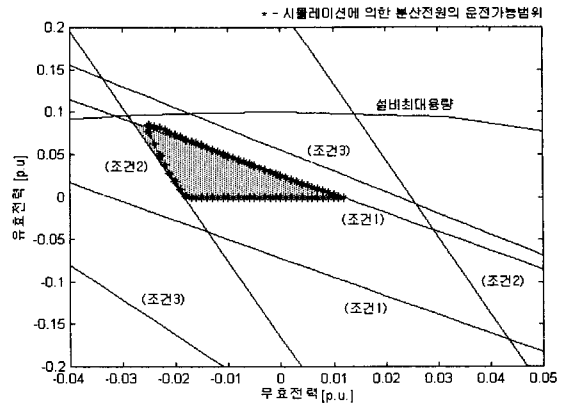


그림 11 가경구간에서의 분산전원 운전가능범위
Fig. 11 Permissible operating range of DG at the KaGyung

그림 11에서 가로축은 분산전원의 무효전력량으로 제안된 수식적인 방법에 의해 산출된 운전가능범위는 진상 0.0281p.u.에서 지상 0.0117p.u.까지이며, 이 때 분산전원의 유효전력량의 범위는 0p.u.부터 0.0883p.u.까지로 나타났다. 또한 시뮬레이션에 의해 산출된 운전가능범위는 무효전력은 진상 0.025p.u.부터 지상 0.011p.u.까지이며, 유효전력은 0p.u.부터 0.08541p.u.까지이다. 즉, 분산전원의 무효전력이 진상 0.025p.u.일 때 제안된 수식적인 방법에 의해 산출된 유효전력은 0.08142p.u.이고 시뮬레이션에 의해 산출된 유효전력량은 0.0854p.u.로 약 0.004p.u.(400kW)의 오차가 발생하였으며, 지상 0.011p.u.일 때 제안된 수식적인 방법과 시뮬레이션에 의해 산출된 유효전력량은 각각 0.00162p.u.와 0.00062p.u.로 오차는 약 0.001p.u (100kW)가 발생하였다.

4.2.2 태성 구간의 말단에 도입

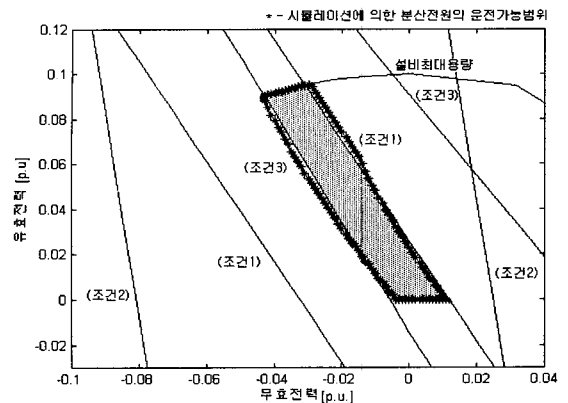


그림 12 태성구간에서의 분산전원 운전가능범위
Fig. 12 Permissible operating range of DG at the TaeSung

태성구간은 서청주 변전소 #2에서 선로의 길이가 가장 길며, 전압강하 또한 가장 심한선로이다. 이 선로의 말단에 분산전원이 도입되는 경우 분산전원 운전가능범위는 다음과 같다.

$$-0.072 - 2.217 \cdot Q_{GT} \leq P_{GT} \leq 0.026 - 2.217 \cdot Q_{GT} \quad (19)$$

$$-0.730 - 9.031 \cdot Q_{GT} \leq P_{GT} \leq 0.224 - 9.031 \cdot Q_{GT} \quad (20)$$

$$-0.014 - 2.424 \cdot Q_{GT} \leq P_{GT} \leq 0.091 - 1.809 \cdot Q_{GT} \quad (21)$$

그림 12에서 제안된 수식적인 방법에 의해 산출된 분산전원의 무효전력량 범위는 전상 0.0117p.u.에서 지상 0.0425p.u.까지이며, 이 때 분산전원의 유효전력량의 범위는 0p.u.부터 0.0884p.u.까지로 나타났다. 또한 시뮬레이션에 의해 산출된 운전가능범위는 무효전력은 전상 0.011p.u.부터 지상 0.0043p.u.까지이며, 유효전력 0p.u.부터 0.08831p.u.까지이다. 즉, 무효전력이 전상 0.043p.u 일 때 제안된 수식적인 방법 및 시뮬레이션에 의해 산출된 유효전력량은 모두 0.0901p.u.로 설비용량제한조건에 의해 오차는 발생하지 않았다.

4. 결 론

분산전원이 기존의 LDC전압조정체계의 배전계통에 도입하게 되면, 분산전원의 출력의 영향으로 인하여 배전전압을 적절하게 유지할 수 없게 될 가능성이 있다. 이에 대해 본 저자는 분산전원의 도입이 22.9kV급 배전계통의 전압조정에 미치는 영향을 분석하고, 분산전원의 운전역률과 운전가능범위 그리고 선로의 전압변동과의 일반적인 관계를 도출하였으며, 주변압기의 탭 동작, 주변압기 임피던스에 의한 전압변동, 선로임피던스에 의한 전압강하(또는 상승)등을 고려하여 전압조정측면에서 본 분산전원의 운전가능범위를 결정하는 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 4장에서 고찰에서와 같이 장시간이 소요되는 시뮬레이션을 통한 결과와 거의 일치하였으므로 그 타당성을 입증할 수 있었다.

감사의 글

“이 논문은 2000년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음”(KRF-2000-003-E00134)

참 고 문 헌

[1] J. Kim et al.: Methods of Determining the introduction Limit 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

[2] 김재언, 조성현, "분산전원이 도입된 복합배전계통의 운용방안에 대한 고찰", 대한전기학회논문지, 제48권, 6호, pp. 692-698, 1999. 6.

[3] T.E. Kim, J.E. Kim: "A Method of Determining the Introduction Limit of Distributed Generation System in Distribution System", Power Engineering Society Summer Meeting, 2001. IEEE, Volume: 1, 2001 Page(s): 456 -461

[4] Turan G nen: Electric Power Distribution System Engineering, McGraw-Hill series in electrical engineering, McGraw-Hill, New York, 1986

[5] Electric Association Group in Japan: The Regulation and Management of Distribution Voltage, report, Vol.24, No.4, 1968. (In Japanese)

저 자 소 개



김 태 응 (金兌應)

1972년 11월 23일생. 1999년 충북대 전기공학과 석사과정 졸업(석사). 1999년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.
Tel: 043-261-2423, Fax: 043-263-2419
E-mail: tykim@engine.chungbuk.ac.kr



김 재 언 (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 전지전력 저장시스템 설계 및 운용, 분산전원 계통연계 해석 및 운용, 복합에너지시스템, 자율분산배전계통, 전력품질 해석 및 진단, Custom Power Devices 등의 연구 분야에 종사. 1995년도 일본 일본전기학회 전력·에너지부문 대회 우수논문발표대상 수상. 현재, 충북대학교 공과대학 전기전자공학부 조교수.
Tel: 043-261-2423, Fax: 043-263-2419
E-mail: jekim@trut.chungbuk.ac.kr