

배전계통 적정전압 유지를 위한 유효·무효전력 협조제어

김태웅\* 김재언  
 충북대학교 전기전자공학부

Real and Reactive power coordination control of Distributed Generation System for Distribution Voltage Regulation

Kim, Tae-Eung Kim, Jae-Eon  
 Chungbuk National University

**Anstract** : This paper reveals some correlations between LDC voltage control method and the output of DGS, and also presents a method for determining the amounts of real, reactive power of DGS for proper voltage regulation of power distribution system with LDC. Proposed method has been applied to a 22.9 kV class power distribution system, and those results show that the distribution system voltage profile is improved.

1. 서 론

21세기의 고도정보화 사회에서는 고품질의 전력서비스가 요구된다. 즉, 초고정밀 기계가공, 초미세기술 즉 나노기술에 의한 공정, 첨단 의료기기에 의한 진단과 치료등에 있어서 고품질의 전기에너지는 필수적이다. 또한 지구환경의 문제는 전세계가 보편적으로 추구해야 할 문제이다. 이와 같은 21세기의 지식기반사회에서는 저렴한 전기가격보다 오히려 환경친화적인 좋은 전기품질과 서비스를 기업이나 수용가가 요구하게 될 가능성이 크다. 이러한 시대적 여건에 부응하기 위하여 최근 다양한 에너지원의 효율적 활용을 위한 한 방법으로서 분산전원의 적극적인 개발과 도입이 관심을 모으고 있다.

기존의 대부분의 배전계통에 있어서 전압조정은 변전소의 MTR뱅크에 설치되어 있는 LDC(Line Drop Compensator)와 LCT(Load-tap Changing Transformer)에 의해 이루어지고 있다.

만약 분산전원 또는 분산전원을 갖는 몇몇의 PPP(Premium power park)s 또는 QCC(quality control center)s가 기존의 방법에 의해 선로전압을 조정하고 있는 배전계통에 도입되면, 부하전류의 변화에 따라 전압조정에 영향을 미치게 되고, 일반적인 저전압 수용가의 말단 전압 허용치를 위배할 가능성이 있다. 그 이유는 기존의 LDC 운전방법은 DGSs가 도입되지 않은 배전계통의 전류의 흐름에 대하여 알맞은 송출기준전압을 중심으로 운전하도록 설정되어있는데, DGSs가 도입되면 전류의 흐름이 바뀌게 되므로 기존의 방법으로는 운전이 어렵게 된다.

이것을 해결할 수 있는 방법중의 하나는 기존의 LDC 운전범위를 벗어나지 않도록 DGSs의 도입한계량을 결정하는 것이고, 또 다른 하나는 기존의 LDC 운전방법과 DGSs 운전사이에서의 협조운전을 할 수 있는 새로운 전압조정방법을 만드는 것이다.

2. 기존배전계통의 전압조정을 위한 배전계통모델

본 장에서는 LDC에 의해 전압이 조정되고 있는 22.9kV급 배전계통을 모델로 선정하여 분산전원의 도

입이 기존배전계통의 전압조정에 미치는 영향을 LDC 동작의 시뮬레이션을 통하여 분석한다.

먼저, 모델배전계통으로서는 주변압기 용량 45/60MVA, 배전선로의 기준용량은 100MVA, 기준전압은 22.9kV로 하였다. 각각의 피더는 용량이 10MVA이며, 피더 1은 농촌 및 주거지역, 피더 2는 도시상업지역, 피더 3은 공장지역 그리고 피더 4는 혼합되어 있는 지역을 모델계통으로 선정하였다. 이 계통의 특징은 다음과 같다

주변압기의 1차측 전압은  $1.0\angle 0^\circ$  로 일정히 유지되는 것으로 하였으며, 주변압기의 임피던스  $j0.25$  p.u., 22.9kV 배전선로의 임피던스  $Z = 0.0347 + j0.0746$  p.u./km, 중부하시의 주상변압기의 평균전압강하 0.02p.u., 고압 및 저압배전선의 평균전압강하 0.04p.u., 저압배전선 말단의 전압강하는 0.07 p.u., 주상변압기의 Tap 비는 0.99839 p.u./1.0 p.u. ( $\sqrt{3} \times 13200 V \div 22900 V / 220 V \div 220 V$ )의 1종류로 하였다. LCT의 탭동작에 있어서, 탭강격은 0.01 p.u.이며, 저압수용가 단자전압 허용범위의 상한치를 233V, 하한치를 207V로 하고, 그 적정전압 기준치는 220V로 하였다.

그림 1과 같은 배전계통모델에 있어서, 중부하시 최대부하전류 및 부하역률, 그리고 경부하시의 최소부하전류는 각각  $I_{max} = 0.38039$  p.u.,  $\cos \theta_{max} = 0.89252$

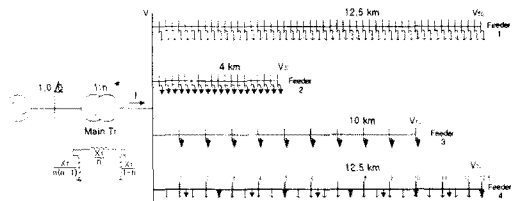


그림 1 모델 배전계통

,  $I_{min} = 0.09053$  p.u.로 되어, 이 때의  $V_{spo, max} = 1.08039$ ,  $V_{spo, min} = 1.01854$ 로 구해져, 이것을 기본 데이터로 하여 LDC내부의 셋팅계수는 참고문헌(3)의 식(2)~(4)에 의거 각각  $R = 0.19045$ ,  $X = 0.09624$ ,  $V_0 = 0.99922$ 로 산출되었다.

먼저, 분산전원의 도입이 고려되지 않은 본래의 배전계통에 있어서 경부하시에서 중부하시 또는 중부하시에서 경부하시로 변화해 갈 때의 송출기준전압변화와 송출전압변화를 시뮬레이션한 결과를 그림 2에, 그리고 이 때 경부하시 및 중부하시의 배전선로 전압변화를 그림 3과 그림 4에 제시한다. 그림2에서 새로측은 전압의 크기, 가로축은 최대부하를 1.0으로 정규화한 부하값을 나타낸다. 그림 3과 그림 4에서의 가로축은 선로의 길이를 나타내며, 주변압기의 송출전압은 송출기준전압을 중심으로 하여 LDC장치내부의 전압비교기의

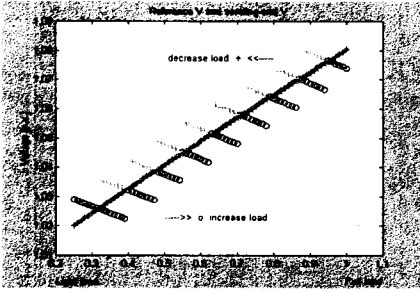


그림 2 DGS가 도입되지 않은 경우의 송출기준전압 및 송출전압의 변화

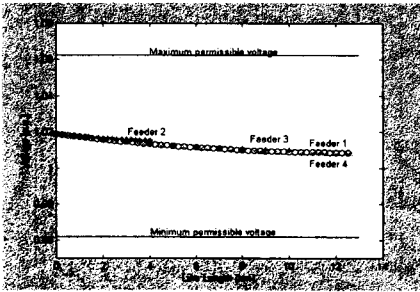


그림 3 DGS가 도입되지 않은 경우하시의 전압특성곡선

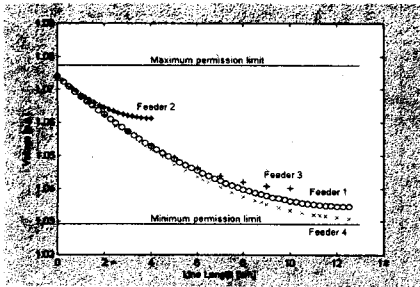


그림 4 DGS가 도입되지 않은 중부하시의 전압특성곡선

동작불감대  $\pm 0.01$  p.u. 내로 조정되고 있다.

그림 3과 그림 4에서 살펴보면, 수용가 단자전압유지의 허용범위 207V ~ 233V를 고려한 중부하시 고압배전선의 유지범위 1.02925 p.u. ~ 1.07735 p.u., 경부하시 고압배전선의 유지범위 0.96186 p.u. ~ 1.06238 p.u.를 모두 만족하고 있다. 따라서 선정된 모델 배전계통은 수용가 단자전압의 허용범위를 잘 유지할 수 있도록 전압조정이 이루어짐을 알 수 있다.

### 3. 배전계통 적정전압 유지를 위한 분산전원의 도입한계량 결정 및 전압협조조정 방법

분산전원이 도입된 배전계통의 적절한 전압조정을 위해서는 전술의 분석결과에 의거 계통특성에 의해 설정되어 있는 LDC의 송출기준전압 저하의 허용한도를 설정하여 두어 이 허용한도까지 분산전원의 도입량을 제한할 필요가 있다.

전압협조조정방법을 유도하기 위하여, 아래와 같이 배전계통 모델에 PPPs 그리고 QCCs가 연결되어있지 않을 때의 몇몇 변수를 정의한다.

$P_{0,j}, Q_{0,j}$  : j 번째 피더의 변전소에서의 송출 유효, 무효전력을 나타낸다.

$P_{Gi,j}, Q_{Gi,j}$  : j 번째 피더의 i 번째 노드에 도입된 분산전원의 유효·무효전력을 나타낸다.

$P_{00} = \sum P_{0,j}, Q_{00} = \sum Q_{0,j}, P_{GT} = \sum P_{Gi,j}, Q_{GT} = \sum Q_{Gi,j}$

$V = V \angle 0^\circ$  ( $P_{00} + jQ_{00}$ 에 대한 변전소 모선에서의 전압)

이 때 뱅크전류는  $(P_{00} + jQ_{00})/V$  가 된다. 이러한 조건하에서, LDC의 운전특성으로부터 아래의 간략화된 부등식이 만족되어야만 한다.

$$V_0 - 0.01 < \sqrt{V^2 - 2(RP_{00} + XQ_{00})} < V_0 + 0.01 \quad (1)$$

만약, PPP 또는 QCC가 피더 4의 10번, 20번 30번 노드에 각각 도입되었다고 하면, 이 노드에 주입되는 전력은 각각  $P_{G10,4} + jQ_{G10,4}, P_{G20,4} + jQ_{G20,4}, P_{G30,4} + jQ_{G30,4}$  이 된다. 이 상태에서 LDC가 적절하게 운전하기 위해서는 아래의 부등식이 만족되어야만 한다

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

이 때, 분산전원이 도입되지 않은 모든 피더에서의 저압 수용가가 전압허용범위내에 존재하기 위해서는 아래의 조건을 만족하여야만 한다.

$$\Delta V > 0 \text{ 일 때, } V_H > V_{\max} + \Delta V \quad (3)$$

$$\Delta V < 0 \text{ 일 때, } V_L < V_{\min} + \Delta V \quad (4)$$

또한, 분산전원이 도입된 모선에서의 전압의 크기에 대하여, 아래의 부등식이 만족하여야만 한다.

$$V_{\text{low, min}} + v_{\text{ptr, drop}} + v_{\text{lowline, drop}} < V_{10} \div 0.99839 < v_{\text{low, max}} + v_{\text{ptr, drop}} \quad (5)$$

$$V_{\text{low, min}} + v_{\text{ptr, drop}} + v_{\text{lowline, drop}} < V_{20} \div 0.99839 < v_{\text{low, max}} + v_{\text{ptr, drop}} \quad (6)$$

$$V_{\text{low, min}} + v_{\text{ptr, drop}} + v_{\text{lowline, drop}} < V_{30} \div 0.99839 < v_{\text{low, max}} + v_{\text{ptr, drop}} \quad (7)$$

여기서,

$v_{\text{low, min}}$  : 저전압 수용가의 말단에서의 최소전압허용치

$v_{\text{low, max}}$  : 저전압 수용가의 말단에서의 최대전압허용치

$v_{\text{ptr, drop}}$  : 추상변압기의 전압강하

$v_{\text{lowline, drop}}$  : 저압배전선의 전압강하

이 샘플배전계통에서,  $v_{\text{low, min}}$  은 207V,  $v_{\text{low, max}}$  은 233V이다. 중부하시  $v_{\text{ptr, drop}}$  은 4.4V이고,  $v_{\text{lowline, drop}}$  은 15.4V이다. 경부하시  $v_{\text{ptr, drop}}$  은 1.1V이고,  $v_{\text{lowline, drop}}$  은 3.85V이다. 따라서, 중부하시  $V_{G10,4}, V_{G20,4}, V_{G30,4}$ 는 1.02925 p.u.에서부터 1.07735 p.u.의 범위 내에 존재하여야만 한다. 또한 경부하시에는 0.96186 p.u.부터 1.06238 p.u. 사이의 범위 내에 있어야만 한다.

결과적으로, 전압협조조정 방법은 다음과 같은 방법에 의하여 구성될 수 있다.

Step 1.  $P_{G(i,j)}$ 의 도입 위치 및 양이 운용자에 의해 결정된다.

Step 2. 변압기의 탭이 변하지 않는  $Q_{GT}$ 의 출력범위를 계산한다

Step 3. 주변압기 전압강하가 전압 상한허용치와 하한허용치를 벗어나지 않는  $Q_{GT}$ 를 계산한다

- Step 4. Step 2와 Step 3 모두를 만족하는  $Q_{GT}$ 의 범위를 산출한다. 만약, 존재하지 않는다면 Step 1으로 가서  $P_{G(i,j)}$ 의 도입량을 줄인다
- Step 5.  $Q_{G(i,j)}$ 를 배분한다
- Step 6. 분산전원 도입에 따른 배전용변전소 주변압기의 전압강하  $\Delta V$ 를 계산한다

$$\Delta V = \frac{\partial V}{\partial P_{G0}}(-P_{G10} - P_{G20} - P_{G30}) + \frac{\partial V}{\partial Q_{G0}}(-\bar{Q}_{G10} - \bar{Q}_{G20} - \bar{Q}_{G30})$$

- Step 7. 분산전원이 도입된 모선에서의 전압 변화량  $\Delta V_{(i,j)}$ 를 계산한다

$$\Delta V_{10} = \frac{\partial V_{10}}{\partial P_{G10}} P_{G10} + \frac{\partial V_{10}}{\partial P_{G20}} P_{G20} + \frac{\partial V_{10}}{\partial P_{G30}} P_{G30} + \frac{\partial V_{10}}{\partial Q_{G10}} Q_{G10} + \frac{\partial V_{10}}{\partial Q_{G20}} Q_{G20} + \frac{\partial V_{10}}{\partial Q_{G30}} Q_{G30}$$

$$\Delta V_{20} = \frac{\partial V_{20}}{\partial P_{G10}} P_{G10} + \frac{\partial V_{20}}{\partial P_{G20}} P_{G20} + \frac{\partial V_{20}}{\partial P_{G30}} P_{G30} + \frac{\partial V_{20}}{\partial Q_{G10}} Q_{G10} + \frac{\partial V_{20}}{\partial Q_{G20}} Q_{G20} + \frac{\partial V_{20}}{\partial Q_{G30}} Q_{G30}$$

$$\Delta V_{30} = \frac{\partial V_{30}}{\partial P_{G10}} P_{G10} + \frac{\partial V_{30}}{\partial P_{G20}} P_{G20} + \frac{\partial V_{30}}{\partial P_{G30}} P_{G30} + \frac{\partial V_{30}}{\partial Q_{G10}} Q_{G10} + \frac{\partial V_{30}}{\partial Q_{G20}} Q_{G20} + \frac{\partial V_{30}}{\partial Q_{G30}} Q_{G30}$$

- Step 8. 분산전원이 도입된 모선에서의 새로운 전압값을 계산한다

$$V_{(i,j)_{new}} = V_{(i,j)_{old}} + \Delta V_{(i,j)} + \Delta V$$

- Step 9. 만약, 분산전원이 도입된 모선에서의 새로운 전압값이 식(5)~(7)을 만족한다면 멈추고, 만족하지 못하면 변전소 모선에서 가장 멀리 있는 노드에 달려있는 PPP 또는 QCC의 무효전력의 절댓값을 감소시키고, 그리고 감소된 양만큼을 변전소 모선에서 가장 가까운 노드에 달린 PPP 또는 QCC의 무효전력에 더한다. 그 다음 Step 6으로 간다.

#### 4. 시뮬레이션 및 증명

제안된 전압협조조정 방법의 타당성을 증명하기 위하여 그림 1의 모델배전계통에 대하여 아래와 같이 시뮬레이션을 하였다.

표 1 분산전원의 유효·무효전력

도입위치 방법		피더 3		피더 4		
		노드 5	노드10	노드10	노드20	노드30
T1	$P_{G(i,j)}$	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
	$Q_{G(i,j)}$	0	0	0	0	0
T2	$P_{G(i,j)}$	0.0235	0.0235	0.0235	0.0235	0.0235
	$Q_{G(i,j)}$	-0.0053	-0.0053	-0.0053	-0.0053	-0.0053

T1: 기존의 전압조정방법, T2 : 제안된 전압협조조정방법

표 1에서 T1은 기존의 전압조정방법으로 운전하고 있는 배전계통에 분산전원이 도입된 양을 나타내며, T2는 제안된 전압협조조정방법으로 운전하고 있는 배전계통에 분산전원이 도입된 양을 나타낸다.

그림 5는 기존의 LDC 전압조정하에서 분산전원이 도입되었을 경우의 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 이 때 분산전원이 도입된 기존의 LDC 전압조정하에서는 Tap이 1.12에서 1.1로 변화하였으며, 그 결과 분산전원이 도입되지 않은 피더 말단에 있는 저압수용가의 전압이 1.0162로 전압하한치를 벗어났다. 그림 6은 제안된 전압 협조조정 방법에 의한 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다.

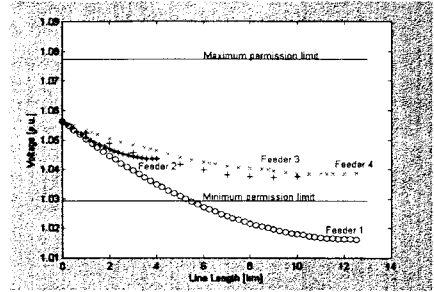


그림 5 LDC 전압조정하의 전압특성곡선

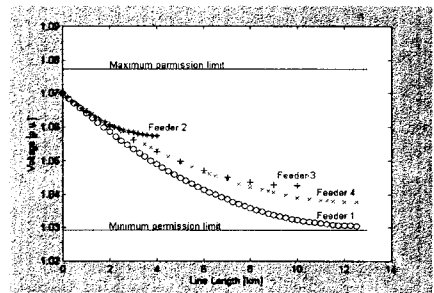


그림 6 제안된 전압조정하의 전압특성곡선

제안된 전압협조조정 방법을 이용하여 LCT의 탭이 변하지 않고, 모든 피더에서의 전압이 전압 허용범위를 만족하는 것을 확인하였다.

#### 5. 결론

본 논문에서는 배전전압조정을 위한 분산전원의 출력을 결정하는 새로운 방법을 제안하였다. 그리고 다품질 배전시스템을 위한 분산전원이 도입된 배전계통에서의 새로운 전압협조제어의 방법을 제안하였다. 제안된 전압 협조 방법은 기존의 LCT & LDC의 전압조정방법에 사용될 수 있고 또한 PPP, QCC 또는 Custom power park에서 DGS의 유효·무효전력을 결정하는데 사용할 수도 있다.

제안한 분산전원의 전압협조조정방법은 22.9kV의 기존 배전계통에 적용하였으며, 시뮬레이션을 통하여 제안된 전압협조조정에서의 전압 특성곡선이 기존의 LDC 전압조정방법을 이용한 방법보다 많이 향상되었음을 확인하였다. 더 나아가 이러한 전압협조조정 방법을 앞으로 다가올 미래의 다품질배전시스템에 적용할 수 있을 것이다.

#### 참고 문헌

- [1] Turan G nen: Electric Power Distribution System Engineering, McGraw-Hill series in electrical engineering, McGraw-Hill, New York, 1986
- [2] Electric Association Group in Japan: The Regulation and Management of Distribution Voltage, report, Vol.24.No.4, 1968. (In Japanese)
- [3] 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