

배전계통에 있어서 최적 송출전압조정에 관한 연구(1)

이은미, 노대석, 오용택, 차준민, 최재석  
 한국기술교육대학교      대전대학교      경상대학교

A Study on the Optimal Sending Voltage Management method in the Distribution Systems (1)

Eunmi Lee, Daeseok Rho, Yongtaek Oh, Junmin Cha, Jaeseok Choi  
 Korea University of Technology,      Dajin University,      Kyeongsang University

1. 서론

최근 생활수준의 향상과 정보통신산업의 급속한 발전으로 인하여, 정보통신기기 및 정밀제어기기 등의 보급증가로 전압품질에 관한 관심이 높아져가고 있다. 특히, 전압품질에 민감한 수용가(산업체, 공장, 상가, 정보산업관련빌딩 등)의 전기피해 보상문제 등이 증가되고 있는 추세이며, 전 세계적으로도 전력품질에 대한 관심이 높아져 각종 전력품질 개선장치로부터 최적 공급시스템에 이르기까지 다양한 각도에서 전력품질을 향상하기 위한 연구개발이 활발하게 수행되고 있으며, 또한 부분적으로 실용화되고 있는 실정이다. 배전계통의 전압분포는 배전용변전소의 송출전압과 고저압선로의 전압강하, 고압선로의 전압조정장치, 고압선로의 구성, 수용가의 부하특성 등 여러 가지 요인에 의해 결정되는데, 이중 가장 큰 영향을 끼치는 요소가 배전용변전소의 송출전압 조정으로, 이것이 적절하게 조정되지 못하면 다른 요인을 아무리 잘 조정해도 수용가의 전압을 적절하게 유지시키는 것이 곤란하다. 따라서, 본 연구에서는 전압조정장치의 최적 도입 및 운용에 대한 알고리즘을 제시하여 효율적인 배전계통의 전압관리 방안을 마련하고자 한다.

2. 배전 계통의 전압 조정 개념

현재 송출전압의 조정방식으로 프로그램 방식과 LDC 방식이 주로 사용되고 있다. 프로그램 방식은 각 시간대별로 타임스위치의 지령에 의해 송출전압을 단계적으로 조정하는 것으로, 간단한 조작으로 여러 송출전압을 얻을 수 있지만, 부하변동의 폭이 큰 경우 적절한 전압강하의 보상이 어렵게 되는 결점이 있다. 반면, LDC 방식은 미리 정해진 전압조정 요소(등가 임피던스와 부하중심점 전압)에 의하여, 시간에 따라 변화하는 고압선로의 전압강하를 보상하면서 송출전압을 조정하는 것으로 유사한 부하변동 특성을 가진 고압선로들로 구성된 뱅크(Bank)에 효과가 크다는 한계성을 가지고 있지만, 프로그램 방식보다 급격한 부하변동에도 유연하게 대응할 수 있어서, 폭 넓게 사용되고 있다. LDC 방식은 정확한 전압조정 요소를 구하는 것이 중요한 문제로서, 특히 분산형전원이 도입된 계통에서의 산정방식은 더욱더 어렵게 된다. 따라서 분산형전원의 운용패턴을 상정하여 전압조정 요소를 최적으로 구하는 방법을 이하에서와 같이 제시하고자 한다.

3. 최적 송출전압 조정 방안

LDC 방식에 의한 송출전압 결정문제는 각 수용가의 전압이 합리적인 분포가 되도록 전압조정 요소를 구하는 것으로, 이 요소는 배전계통의 등가적인 전압강하 특

성을 나타낸다. 즉, 먼저 시간에 따라 변화하는 이상적인 최적 송출전압(최적 전압보상율)을 결정하고, 이것과 총 부하전류와의 상관관계를 통계적인 수법을 이용하여 최적 전압조정 요소를 구한다.

3.1 최적전압보상율

일반적으로 배전용변전소의 송출전압은 그림1과 같이 부하시 탭절환변압기(LRT : Load-Ratio Transformer)에 의하여 5~6개의 피더를 일괄하여 조정한다. 그러나, 각각 다른 부하특성을 가진 피더를 동시에 고려하여 전압조정을 한다는 것은 어렵고, 배전계통내에 분산형전원(분산형 전력저장시스템 포함)이 도입·운용되는 경우에는 더욱더 복잡하게 된다. 여기서는 분산형전원(DSG)의 운용특성을 고려하기 위하여, 분산형전원의 운용에 의하여 가장 가혹한 조건이 되는 피더를 선택하여, 이 피더의 수용가 전압을 허용범위 이내로 유지시켜, 다른 피더의 수용가전압도 적정범위 내로 유지시키는 개념을 이용하였다.

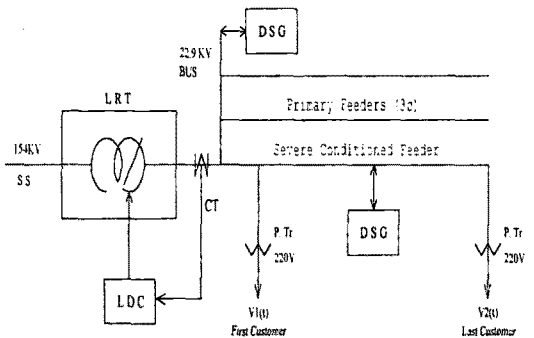


그림1 분산형전원을 포함한 배전계통의 전압조정방안

송출전압의 결정문제는 그림 2와 같이, 선택되어진 가장 가혹한 조건의 피더의 직하 및 말단의 수용가전압(최대와 최소전압점)을 가능한 표준전압(220V)의 근방에 유지시키도록 최적 전압보상율을 구하는 것이 된다. 이 문제는 등가적으로 LRT 직하의 수용가전압과 규정전압의 상한치(233V), 하한치(207V)와의 차의 제곱을 최소화시키는 문제로 나타낼 수 있다.

문제의 정식화

$$\text{Min } J(t) = \{ V1_{\text{max}}(t) - V1(t) \cdot X_{\text{mtr}} / R_{\text{mtr}} \}^2 + \{ V1(t) \cdot X_{\text{mtr}} / R_{\text{mtr}} - V1_{\text{min}}(t) \}^2 \quad \text{--- (1)}$$

Subj.to,  $V1max(t) = Vmax$  --- (2)

$V1min(t) = Vmin \cdot V1(t) / V2(t)$  --- (3)

여기서,

t : 시간대,

V1(t), V2(t) : LRT 직하 및 말단의 수용가전압,

V1max(t), V1min(t) : LRT 직하로 환산된 규정전압의 상하한치

Vmax : 규정전압의 상한치

Vmin : 규정전압의 하한치

Rmtr : LRT의 전압보상율

Xmtr : LRT의 최적 전압보상율

여기에서는 상기 문제의 간략화와 계산의 오차를 피하기 위하여, LRT 직하와 말단의 수용가전압이 고압선로의 전압강하에 의하여 비례적으로 변화한다는 사실에 주목하여, 말단의 수용가전압의 변동특성을 등가적으로 LRT 직하의 값으로 환산하였다. 즉, (2) 식과 (3) 식은 LRT 직하점에서 바라본 새로운 규정전압의 상하한치를 나타낸 것으로, 상한치는 전압변동에 관계없이 일정하지만, 하한치는 직하에서 말단까지의 전압강하에 의하여, 시간과 함께 변화하는 특성을 가지고 있다.

따라서, 상기 문제에 대한 최소화조건( $dJ / dXmtr = 0$ )에 의하여, 각 시간대의 최적 전압보상율은 다음식과 같이 구해진다.

$Xmtr = Rmtr \cdot \{ V1max(t) - V1min(t) \}^2 / 2V1(t)$  --- (4)

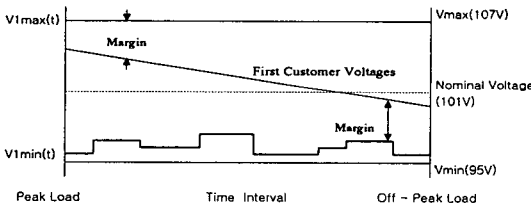


그림 2 최적전압조정방안의 개념

### 3.2 최적전압요소

배전용변전소의 이상적인 최적 송출전압과 총 부하전류와의 상관관계는 그림3과 같이 시간과 함께 변화하는 비선형적인 상관관계 특성을 가지고 있다. 그러나, LDC의 전압조정 요소는 한번 정해지면 일정기간 같은 값으로 운용되기 때문에, 최적 송출전압은 식 (5) 와 같이 근사식으로 나타낼 수 있다. 따라서, 전압조정 요소의 결정문제는 이상적인 최적송출전압분포의 편차를 최소화하도록 식 (5)의 계수를 구하는 문제로 되어 최소자승법에 의해 식 (6) 과 같이 정식화할 수 있다.

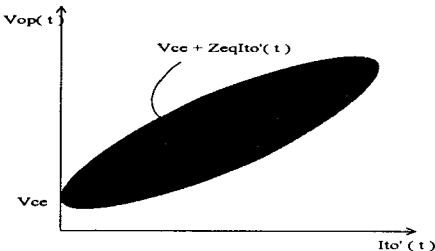


그림3 최적송출전압의 분포 특성

문제의 정식화

$Vopt(t) = Vce + Zeq \cdot Ito'(t)$  --- (5)

$Min q = \sum_{t=1}^T \{ Vopt(t) - (Vce + Zeq \cdot Ito'(t)) \}^2$  --- (6)

여기서,

T : 전체 시간대

Vopt(t) : Xmtr에 의한 최적 송출전압

Vce : 부하중심점의 전압

Zeq : 등가임피던스

Ito'(t) : 분산형전원을 포함한 총 부하전류

$(Ito'(t) = Ito(t) \pm Idsg(t))$

Ito(t) : LRT의 총 부하전류

Idsg(t) : 분산형전원의 도입용량

식 (6) 을 최소화( $\partial q / \partial Zeq + \partial q / \partial Vce = 0$ )하여, 전체 고찰기간의 최적 전압조정요소(Zeq, Vce)를 구하면 다음식과 같다.

$Zeq = \{ \sum_{t=1}^T Ito'(t) \cdot \sum_{t=1}^T Vopt(t) - T \cdot \sum_{t=1}^T Ito'(t) \cdot Vop(t) \} / \{ ( \sum_{t=1}^T Ito'(t) )^2 - T \cdot \sum_{t=1}^T (Ito'(t))^2 \}$  --- (7)

$Vce = \{ \sum_{t=1}^T Ito'(t) \cdot Vop(t) - Zeq \cdot \sum_{t=1}^T (Ito'(t)) \}$  --- (8)

## 4.시뮬레이션

### 4.1 모델계통 및 제조건

①분산형전원을 포함한 모델 배전계통은 그림 4와 같이 22.9kV계통을 상정하며, 고압선로의 구간데이터는 표1과 같다.

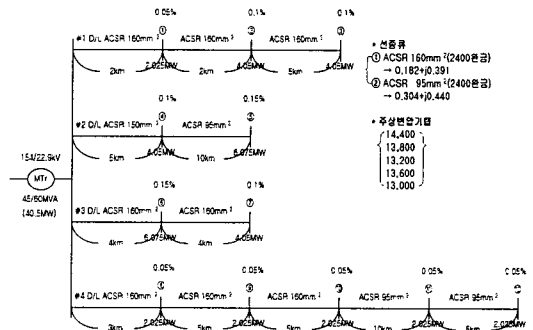


그림4 배전계통 모델

②배전용변전소의 LRT의 일부하 패턴은 그림 5와 같이, 45MVA의 피크부하를 기준으로 100%~20%의 부하변동 특성을 가진다. 피크부하는 1~8시간대, 미들부하는 9~16시간대, 오프피크부하는 17~24시간대로 한다.

③주상변압기의 탭 변경점은 피크부하시의 전압강하가 5%이상인 지점을 기준으로 선정하며, 1차측은 14,400V, 13,800V, 13,200V, 12,600V, 12,000V의 5가지 탭을 사용하며, 2차측은 115V(230V)를 기준으로 한다

Feeder Number	Section Number	Node Number		Impedance		Length (m)	Pole Tr. Tap	Load(kW)
		From	To	R(Ω/m)	X(Ω/m)			
1	1	0	1	0.182	0.391	2.0	22900/230	5.7
	2	1	2	0.182	0.391	2.0	22900/230	10.7
	3	2	3	0.182	0.391	5.0	22900/230	10.7
2	4	0	4	0.182	0.391	5.0	22900/230	10.7
	5	1	5	0.301	0.110	10.0	21400/230	15.7
	6	0	6	0.182	0.391	4.0	22900/230	15.7
3	7	6	7	0.182	0.391	1.0	22900/230	10.7
	8	0	8	0.182	0.391	3.0	22900/230	5.7
4	9	8	9	0.182	0.391	5.0	22900/230	5.7
	10	9	10	0.182	0.391	5.0	22900/230	5.7
	11	10	11	0.301	0.110	10.0	21400/230	5.7
	12	11	12	0.301	0.110	5.0	21400/230	5.7

표1 배전계통 구간데이터

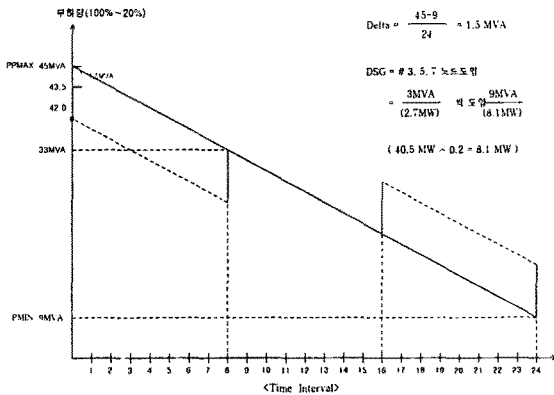


그림5 일부하 곡선

- ④지압선로에 있어서, 주상변압기와 인입선, 저압선로의 최대 전압강하는 각각 4V, 4V, 8V로 상정한다.
- ⑤계산의 간략화를 위하여, 배전계통의 부하는 평등부하분포로 가정하며, 고압선로의 구간별 전압강하는 다음 식과 같이 산정된다.

$$\Delta V = K \cdot (I_s + I_r) \cdot Z \cdot L \quad (9)$$

단,  $\Delta V$  : 고압선로의 각구간의 전압강하(Ω)  
 K : 전압방식의 계수(K=1, 삼상4선식)  
 $I_s, I_r$  : 구간 유입·유출전류(A)  
 Z : 전선1조당 등가임피던스 (Ω/km),  
 L : 경간 (km)

4.2 시뮬레이션 결과 및 평가

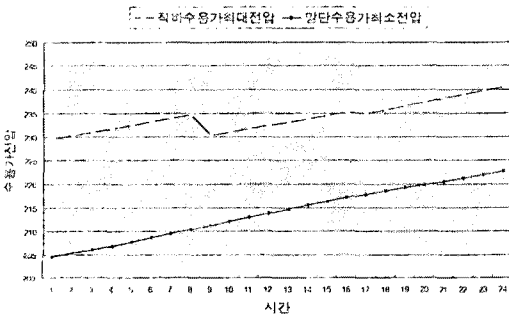


그림7.1 송출전압고정방식에 의한 수용가 전압특성

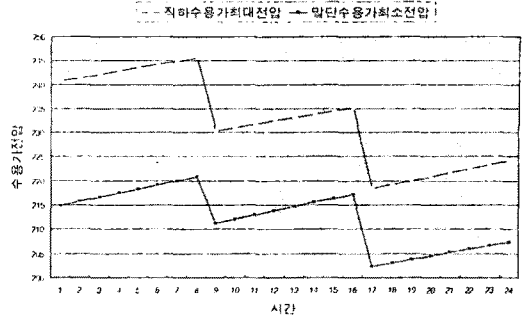


그림7.2 프로그램방식에 의한 수용가 전압특성

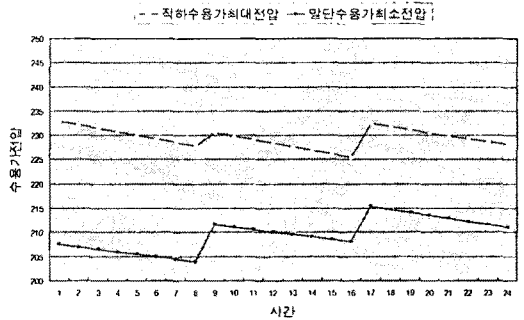


그림7.3 LDC방식에 의한 수용가 전압특성

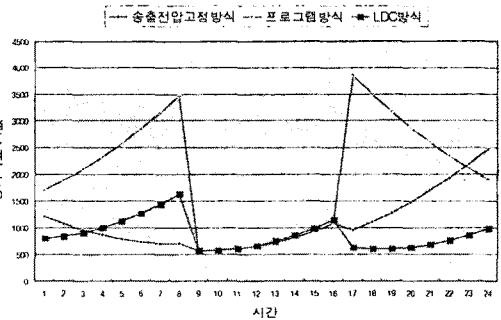


그림8 각 방식의 평가지표의 비교

상기의 고압측 전압을 기준으로 배전용변전소의 직하수용가 적하전압의 최대값과 말단수용가의 말단전압 최소값을 환산하여, 각 수법의 시간에 따른 수용가 전압의 곡선을 나타내면 그림 7.1, 그림 7.2, 그림 7.3과 같다. 그림 7.1에서 볼수 있듯이 송출전압 고정방식은 부하의 감소에도 불구하고 과도한 송출전압을 송출하게 하여 말단 수용가에게 과전압을 일으키게 한 것을 알 수 있다. 프로그램 방식에 의한 송출전압 결정은 그림 7.2에서 볼수 있듯이 분산형전원을 제대로 고려하지 않고 송출전압을 결정해서 오히려 송출전압고정방식보다 평가지표(PI)가 더 높게나타나는 것을 볼수 있다. LDC 방식에 의한 송출전압 결정이 그림 7.3에서도 볼수 있듯이 수용가전압이 다른 두 개의 비교방식보다 합리적으로 표준전압근방에 유지되는 것을 볼수 있었다. 또한 LDC 방식이 분산형전원에 대한 의존도가 상대적으로 낮음을 받

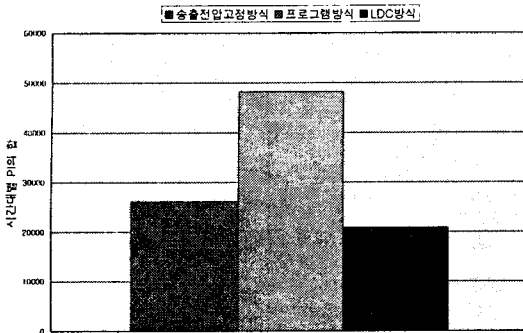


그림9 각 방식의 시간대별 평가지표 PI의 합

견할 수 있다. 그림 8에서 볼수 있듯이 각 방식의 평가지표 또한 LDC 방식의 값이 제일 낮고 평이한 곡선을 그리며 각 평가지표의 합 또한 그림9에서 볼수 있듯이 LDC방식이 가장 낮음을 볼 수 있다. 즉 이 3가지 방식 중 LDC 방식이 수용가 전압을 표준전압 근방으로 유지하는 가장 적절한 방식임을 알 수 있다.

**감사의 글**

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호: 2000-1-30200-006-3) 지원으로 수행된 결과의 일부임

**[참 고 문 헌]**

- [1] 이은미, 노대석 “배전계통의 전압관리 현황과 개선 방안에 관한 연구”, 2002 대한전기학회 춘계학술대회 논문집, 2002. 5
- [2] Daeseok Rho, Horiyuki Kita, Kenichi Nishiya and Hasegawa Jun, “Voltage Regulation Methods Based on an Extended Approach and Neural Networks for Distribution System interconnected with DSG systems”, 일본전기학회 지B, 117권 3호, 1997년3월
- [3] Koichi Nara and Hasegawa Jun, “A New Flexible, Reliable and Intelligent Electrical Energy Delivery System”, 일본전기학회지B, 117권, 1호, 1997년1월
- [4] Daeseok Rho, Hiroyuki Kita and Hasegawa Jun, “Basic Studies on the Impacts of Customer Voltages by the Operation of FRIENDS”, 일본전기학회 전국대회 No.1486, 1997년3월