

여기서, $V3(t)$, $V4(t)$: SVR 직하, 말단의 수용가 전압, $V3max(t)$, $V3min(t)$: SVR 직하로 환산된 허용 전압의 상, 하한치, $V3X(t)$: 최적 전압보상율이 적용된 $V3(t)$, Rvr : SVR의 전압보상율, Xvr : SVR의 최적 전압보상율, $Rmtr$: 배전용변전소의 전압보상율, $Xmtr$: 배전용변전소의 최적 전압보상율, Vn , $Vtap$: SVR의 정격전압, SVR의 탭전압, K : 무계상수

이 목적함수는 배전용변전소와 선로전압조정장치측의 직하 수용가 전압이 상, 하한치로부터 최대여유를 가지고 그것들의 값이 규정전압에 근접하게 유지되는 것을 의미한다. 방정식 (3)에서 첫번째, 두번째 항목은 배전용변전소측 수용가 전압이 오직 배전용변전소 ULTC를 조절함에 의해서 적당한 전압을 유지함을 보여준다. 세번째, 네번째 항목은 선로전압조정장치측의 수용가 전압이 배전용변전소와 선로전압조정장치측의 ULTC 조절에 의해 적당한 전압을 유지함을 보여준다. 그 항목은 식 (1)의 배전용변전소에서 공급하는 고압배전선로와 선로전압조정장치측의 내부 전압강하분을 고려한 직하 수용가 전압 관계로부터 유도된다. 다섯번째 항목은 탭변동횟수를 줄이기 위한 배전용변전소와 선로전압조정장치 사이의 조정 레벨이다. 식 (3)에서 K 는 전압조정장치간의 협조를 요구하는 정도에 따라 정하는 상수로서 전압레벨을 감안하여 정한다. 그러므로 목적함수 식 (3)이 최소가 되기위한 조건은 다음 식이 정정치로 되는 $Xmtr$ 과 Xvr 를 구하는 문제이다.

$$\nabla J = \begin{pmatrix} \partial J / \partial Xmtr \\ \partial J / \partial Xvr \end{pmatrix} = 0 \quad (7)$$

여기서, ∇J : $Xmtr$ 과 Xvr 에 대한 J 의 편미분한 구배 벡터

식 (7)의 행렬 요소는 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned} \partial J / \partial Xmtr = & \{ 2.0 \cdot V1(t) / Rmtr \cdot (2.0 \cdot V1(t) \cdot \\ & Xmtr / Rmtr - V1max(t) - V1min(t)) + \\ & (2.0 \cdot V1(t) \cdot Xvr \cdot Vn / (Rmtr \cdot Vtap) \\ & \cdot (2.0 \cdot V1(t) \cdot (Xmtr / Rmtr - 1.0) \cdot \\ & Xvr \cdot Vn / Vtap + 2.0 \cdot V3(t) \cdot Xvr / \\ & Rvr - V3max(t) - V3min(t)) + \\ & (2.0 \cdot K \cdot (Xmtr - Xvr)) \} \quad (8) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \partial J / \partial Xvr = & \{ 2.0 \cdot (V3(t) / Rvr + V1(t) \cdot (Xmtr / \\ & Rmtr - 1.0) \cdot (Vn / Vtap)) \cdot (2.0 \cdot Xvr \cdot \\ & V1(t) \cdot (Vn / Vtap) \cdot (Xmtr / \\ & Rmtr - 1.0) - V3max(t) - V3min(t) + 2.0 \cdot \\ & V3(t) \cdot Xvr / Rvr) + \\ & (2.0 \cdot K \cdot (Xvr - Xmtr)) \} \quad (9) \end{aligned}$$

반복 계산하는 알고리즘은 다음식과 같다.

$$\begin{pmatrix} X_{mtr} \\ X_{vr} \end{pmatrix}^{(K+1)} = \begin{pmatrix} X_{mtr} \\ X_{vr} \end{pmatrix}^{(K)} + (B^{(K)})^{-1} \cdot (\nabla J) \quad (10)$$

따라서, 상기 목적함수 식 (7)의 최소화 조건에 의하여, 각 시간대의 최적 전압보상율이 구해진다. 식 (7)의 비선형 목적함수의 최소화 문제는 반복법이 일반적으로 사용되는데 적당한 초기값을 제공함에 의해 최적해에 수렴한다. 본 논문은 quasi-Newton법을 사용하였고 최적해 산정 과정은 그림 2의 flow chart와 같다.

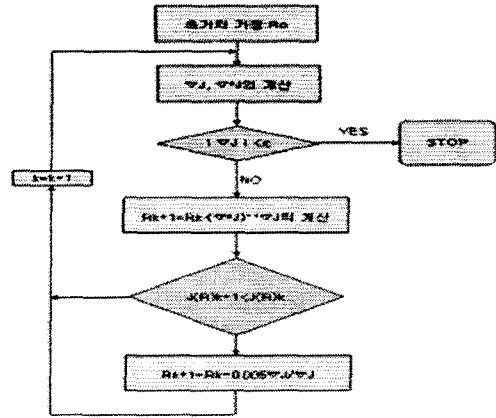


그림 2 최적 전압보상률 산정을 위한 flowchart

3. 시뮬레이션 결과 및 분석

분산형 전원이 도입된 모델계통에 대해서, 배전용변전소와 선로전압조정장치측의 ULTC 최적 전압조정 알고리즘을 모델계통에 적용시켜 시뮬레이션을 수행한다.

3.1 평가 방법

각 수법의 유효성을 비교하기 위해 두가지 방법으로 평가하였다. 하나는 평가지표를 도입하고, 다른 하나는 ULTC 탭 총변동횟수를 비교한다.

(1) 평가지표의 정의

배전계통 내의 수용가 전압의 양부는 각 수용가 전압이 표준전압에 어느정도 가깝게 유지되는가를 산정함으로써, 평가할 수 있다. 즉, 평가지표(PI : Performance Index)는 전체 고찰시간대에 대하여 전체 대상노드의 수용가 전압과 표준전압과의 편차의 제곱 합으로 나타낼 수 있다.

$$PI = \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \{ |V1(t, k) - Vstd|^2 + |Vstd - V2(t, k)|^2 \} \quad (11)$$

여기서, T : 전체 고찰시간, K : 노드의 총수, $Vstd$: 표준전압 (220V), $V1(t, k)$: 각 노드직하의 수용가 전압, $V2(t, k)$: 각 노드말단의 수용가 전압

상기의 지표는 배전계통에 있어서 전체 수용가의 전압 분포특성의 수준을 평가하는 것으로, 평가지표가 작으면 작을수록 수용가 전압특성이 양호하다는 것을 나타낸다. 따라서 각 전압조정 수법에 의한 평가지표 값을 비교함으로써, 그 수법자체의 좋고 나쁨도 평가할 수 있다.

(2) ULTC의 Tap 총 변동횟수

배전용변전소와 선로전압조정장치에 있어서, 불감대폭의 탭간격은 50%로 운용되고 있으며, 현재 주류로 되고 있는 17개 탭 LRT의 탭 간격은 1.25%가 표준이다. 여기에서는 지연시간은 고려하지 않고 초기 탭 위치를 9(22,900V)에 놓고 배전용변전소와 선로전압조정장치측의 ULTC 탭 총변동횟수를 수법에 따라 비교하여, 그 수법의 우수성을 평가한다.

3.2 시뮬레이션에 사용된 송출전압 조정방식

① 방식1 (LDC+Fixed(SVR) Method) : 배전용변전

소의 송출전압은 LDC 방식으로 조정하고 선로전압조정 장치의 송출전압은 22,900V로 고정시켜 송출하는 방식
 ② 방식2 (LDC+Programmed(SVR) Method) : 변전소의 송출전압은 LDC 방식으로 조정하고 선로전압조정 장치의 송출전압은 프로그램 방식으로 조정하는 방식
 ③ 방식3 (LDC+LDC(SVR) Method) : 배전용변전소와 선로전압조정 장치의 송출전압을 각각 독립적으로 LDC 방식으로 조정하는 방식
 ④ 방식4 (Proposed Method) : 본 연구 제안 방식으로 배전용변전소와 선로전압조정 장치의 송출전압을 상호 협조하여 운영하는 최적전압조정 알고리즘을 이용하여 조정하는 방식

3.3 모델계통과 제조건

- ① 모델계통은 그림 3과 같이 22.9KV계통이며, 고압배전선로의 구간데이터는 표 1과 같다.
- ② 배전용변전소의 일부하 패턴은 그림 4와 같이 45MW의 피크부하를 기준으로 오프피크부하는 1~8시간대, 피크부하는 9~16시간대, 미들 부하는 17~24시간대로 한다.
- ③ 역률은 0.9를 적용한다.
- ④ 저압측의 전압강하 배분은 주상변압기와 인입선, 저압선로의 최대 전압강하를 각각 4V, 4V, 8V로 상정한다.
- ⑤ 고압배전선로의 전압강하를 계산하기 위하여, 가우스사이델법(Gauss-Seidel Method)을 이용한 조류계산법을 이용한다.
- ⑥ 선로전압조정 장치의 설치지점은 그림 3의 10번 지점으로 상정하였으며, 운용패턴은 위의 방식 4가지를 비교한다.
- ⑦ 분산형전원은 그림 3의 노드 7, 8, 9에서 공급하고 공급형태는 분산형전원 특성상 다음의 3가지 형태를 비교한다.
 - 분산형전원이 없는 경우
 - 분산형전원이 방전(9~16시대)만 하는 경우
 - 분산형전원이 충전(1~8시간), 방전(9~16시간)하는 경우
- ⑧ 분산형전원의 도입량은 2가지 경우로 가정한다.
 - 피크부하의 5%로 7, 8, 9 노드 각 750(Kw) 공급한다. $45,000(Kw) \times 0.05 = 2,250(Kw) / 3 = 750(Kw)$
 - 피크부하의 10%로 7, 8, 9 노드 각 1500(Kw) 공급한다. $45,000(Kw) \times 0.1 = 4,500(Kw) / 3 = 1,500(Kw)$

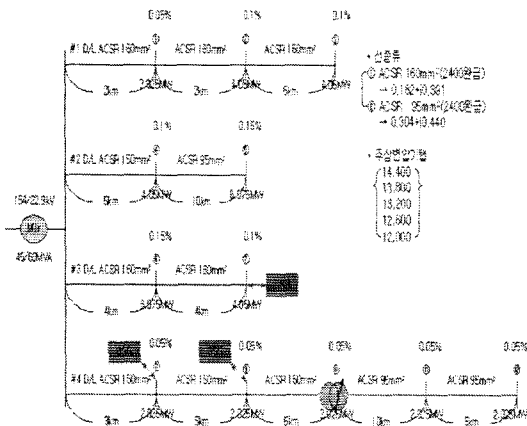


그림 3 분산형전원이 도입된 모델계통

표 1 모델계통 구간데이터

Feeder Number	Section Number	Node Number		Impedance		Length (km)	Pole Tr Tap	Load (%)	DSG (KW)
		From	To	R (Ω/km)	X (Ω/km)				
1	1	0	1	0.182	0.391	2.0	22900/230	5%	0
	2	1	2	0.182	0.391	2.0	22900/230	10%	0
	3	2	3	0.182	0.391	5.0	22900/230	10%	0
2	4	0	4	0.182	0.391	5.0	22900/230	10%	0
	5	4	5	0.304	0.440	10.0	21800/230	15%	0
3	6	0	6	0.182	0.391	4.0	22900/230	15%	0
	7	6	7	0.182	0.391	4.0	22900/230	10%	750
4	8	0	8	0.182	0.391	3.0	22900/230	5%	750
	9	8	9	0.182	0.391	5.0	22900/230	5%	750
	10	9	10	0.182	0.391	5.0	22900/230	5%	0
	11	10	11	0.304	0.440	10.0	21800/230	5%	0
	12	11	12	0.304	0.440	5.0	21800/230	5%	0

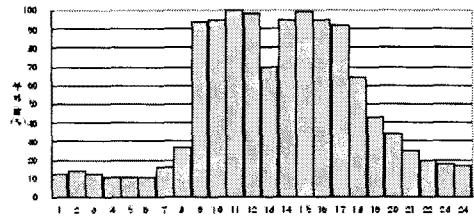
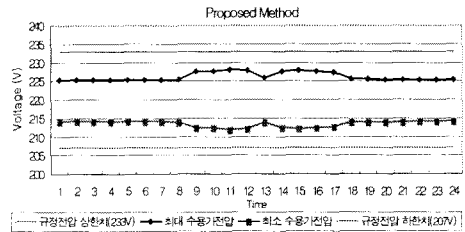


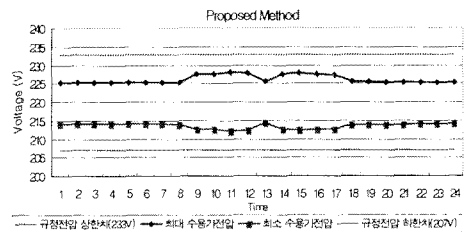
그림 4 모델계통의 일부하 곡선

3.4 시뮬레이션 결과

분산형전원이 도입된 배전계통에서 배전용변전소와 선로전압조정 장치의 ULTC에 대해 기존의 전압조정방안과 본 연구에서 제안한 방안에 대한 평가지수를 비교한다. 상기의 4가지 전압조정 방안을 비교해 본 결과, 본 연구에서 제안한 배전용변전소와 선로전압조정 장치의 ULTC를 상호 협조하여 운영하는, 송출전압을 최적전압 조정하는 알고리즘을 이용한 LDC방식으로 조정하는 방식 4가 가장 우수하였다. 그림 5는 분산형전원이 4,500(Kw)의 부하를 가지고 공급형태에 따른 수용가 전압분포를 보여주는 것으로 규정전압에 가깝게 유지됨을 확인할 수 있다.



(a) 분산형전원 무



(b) 분산형전원 방전

4. 결 론

배전시스템의 전력품질에 대한 요구와 필요성이 증대되고 있는 가운데, 간단하며, 신뢰성 있고, 경제적으로 전압품질을 향상시키기 위한 선로전압조정장치(SVR, PVR)는 우리나라에서 337개가 도입(2003년 4월 기준)되었고, 앞으로도 수요가 늘어날 예정이다. 하지만 배전용변전소와 상호 협조를 이루며 합리적으로 전압보상을 분담하지 못하면 선로전압장치의 효용성을 충분히 본다고 하기 어렵다. 따라서 본 논문에서는 배전용변전소와 선로전압조정장치(SVR, PVR)의 ULTC 협조를 이루어 최적 전압조정하는 방안을 제시하였다.

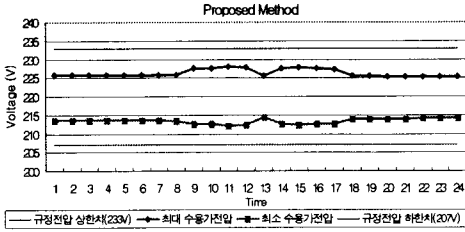
(1) 배전시스템의 최적 전압조정을 위해, 최적 전압보상율의 개념을 설명하였으며 배전용변전소와 선로전압조정장치의 ULTC 연계 운영하는 최적 전압조정 알고리즘을 제시하였다.

(2) 배전시스템의 최적 전압조정을 위해 제안된 수법이 기존의 수법에 비해 평가지수가 우수하여 규정전압에 더 가깝게 유지됨을 확인하였고, ULTC 탭 총변동횟수를 비교하여 제안된 수법이 선로전압조정장치의 탭 총변동횟수를 현격히 감소시킴을 확인하였다.

(3) 배전시스템에 선로전압조정장치가 도입되어도 특성이 다른 분산형전원 도입과 운용에 유연함을 알 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] 이은미, 노대석, 김미영, "고압배전선로의 선로전압조정장치(SVR)의 운용에 관한 연구(2)", 대한전기학회 하계학술대회 논문집 A권, 2003
- [2] Daeseok Rho, Eunmi Lee, "A study on the Optimal Operation of Line Voltage Regulator(SVR) on Distribution Feeders", IFAC 논문집 III권, 2003
- [3] "배전전압관리 개선에 관한 연구" 한전 전력연구원, 2004
- [4] "고유연·고신뢰·고효율 전기에너지 유통시스템 개발에 관한 기초연구" 한국전기연구원, 1998
- [5] 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", 일본전기학회지B, 117권 3호, 1997년 3월
- [6] Joonho Choi, Haekon Nam, Jaechul Kim and Seungil Moon, "The Cooperation Schemes of LTC and SC for Distribution Volt/Var Compensation" 대한전기학회



(c) 분산형전원 총방전

그림 5 분산형 전원의 공급형태에 따른 수용가 전압특성

또한, 분산형전원의 공급형태에 따른 각 수법의 평가 지수를 비교해 보면 표 2와 같다. 배전용변전소와 선로전압조정장치의 ULTC 상호 협조하여 운영하는 경우가 가장 우수하며 분산형전원의 출력이 있어도 전체적으로 규정전압에 가깝게 유지됨을 볼 수 있다.

또한, 각 수법의 ULTC 탭 총변동횟수는 표 3과 같다. 배전용변전소와 선로전압조정장치의 ULTC 상호 협조하여 운영하는 경우와 기존 수법들을 비교해 보면, 배전용변전소 ULTC 탭 총변동횟수는 약간의 변동만 있으나 선로전압조정장치 탭 총변동횟수는 현격히 감소됨을 알 수 있다.

그리고 고압배전선로에 선로전압조정장치가 도입이 되면서 배전용변전소와 협조 운용을 하는 경우와 협조 운용하지않는 경우의 LDC 값은 표 4와 같다.

표 2 각 방식의 평가지표 합계 비교

DSG (Kw)	DSG 공급형태	Ldc+ Fixed Method	Ldc+ Programed Method	Ldc+Ldc Method	Proposed Method
2,250	zero	16331.3	12559.5	10953.3	10064.4
	방전	16205.0	12433.1	10826.9	10040.4
	충방전	16234.6	12462.7	10856.5	9988.3
4,500	zero	16331.3	12559.5	10953.3	10064.4
	방전	16111.9	12340.0	10733.8	9982.3
	충방전	16305.3	12533.4	10927.2	9891.0

표 3 각 방식의 ULTC 탭 총변동횟수

DSG (Kw)	DSG 공급형태	ULTC tap (50%)	SVR tap (50%)
2,250	zero (existing)	24	18
	zero (proposed)	22	6
	방전 (existing)	26	18
	방전 (proposed)	22	6
	충방전 (existing)	24	18
	충방전 (proposed)	22	6
4,500	zero (existing)	24	18
	zero (proposed)	22	6
	방전 (existing)	26	18
	방전 (proposed)	22	6
	충방전 (existing)	25	18
	충방전 (proposed)	20	6

표 4 최적전압조정방안의 LDC 값

DSG (Kw)	DSG	Ldc+Ldc Method		Proposed Method	
		Zeq[Ω]	Vce[V]	Zeq[Ω]	Vce[V]
2,250	zero	1.9414	21319.1683	1.7500	21318.3598
	방전	2.0086	21303.3043	1.8106	21303.7153
	충방전	2.0976	21202.8058	1.8980	21206.9473
4,500	zero	1.9414	21319.1683	1.7500	21318.3598
	방전	2.0765	21288.1653	1.8922	21284.5535
	충방전	2.2678	21071.3820	2.0816	21073.2418