

고압배전선로의 선로전압조정장치(SVR)의 최적운영에 관한 연구(2)

이은미, 노대석, 김미영 김재언 최재석 박창호 김응상
 한국기술교육대 충북대 경상대 한전전력연구원 한국전기연구원

A Study on the Optimal Operation of Step Voltage Regulator(SVR)
 in the Distribution Feeders(2)

Eunmi Lee, Daeseok Rho, Miyoung Kim Jaeon Kim Jaeseok Choi Changho Park Eungsang Kim
 Korea University of Technology Chunbuk Kyeongsang KEPRI KERI

1. 서론

최근, 배전계통의 고압 배전선로의 전압강하가 5%를 초과하는 장거리 선로에 대한 효율적인 전압관리가 미흡한 상태이며, 배전선로의 전압을 제어하기 설치하는 선로 전압조정장치(Step Voltage Regulator : SVR)의 잦은 고장 및 설치공간 파다점유로 전압조정장치의 설치·사용실적이 미진하고, 동 기기의 운용 및 설치기준에 정립이 시급한 실정이다. 따라서 전압강하 5% 초과지역에 대한 효율적인 전압관리 개선방안을 강구하기 위하여, 현재 배전사업소에 도입, 설치되고 있는 전압조정장치(SVR)의 운용기준 제정은 물론, 적정용량 및 최적위치선정에 대한 방안을 제시하는 연구가 필요하다.

2. 기존의 선로전압 조정장치의 전압조정방안

이 방식은 송출전압 조정영역도를 이용해 가장 합리적인 부하중심점 전압과 등가임피던스를 구하고 부하에 따른 통과 전류를 곱해 전압강하분을 보상해 주는 개념이다. 실제로 외국의 전력회사에서 사용되고 있는 방식으로 그 개념은 다음과 같다.

2.1 송출전압 조정의 식

송출전압 조정의 기본은 선로전압강하를 보상함으로써, 전압강하가 부하(통과전류)에 비례하여 발생한다고 가정할 수 있으므로, 고압선 부하율과 희망 송출전압을 관련시켜서 생각할 필요가 있다. 중·경부하시를 통하여, 부하분포와 부하역율이 동일하고, 고압선의 부하율에 비례하여 고압선 전압강하가 발생한다고 가정하는 경우, 각 탭의 수용가에 있어서 규정치(220±13V)를 초과하지 않는 변전소의 송출전압 E_s 와 부하율의 관계는 다음과 같은 두식으로 나타내는 범위로 유지할 필요가 있다.

(상한치)

$$E_s = -\frac{(V)_{\pi}}{230} \times (233 + V_d) - \Delta V + V_{H(i-1)} \times f_h \quad \text{---(1)}$$

(하한치)

$$E_s = -\frac{(V)_{\pi}}{230} \times (207 + V_e) + \Delta V + V_{H(i)} \times f_h \quad \text{---(2)}$$

여기서,

- V_{max} : 수용가단 규정치 전압의 상한치 (233V)
- V_{min} : 수용가단 규정치 전압의 하한치 (207V)
- E_s : 중부하시 송출전압
- ΔV : 송출전압 변동분(목표전압과의 편차)
- $V_{H(i-1)}$: 송출단에서 i구간 직전까지의 중부하시 전

압강하 (변압기탭 개시점)

- $V_{H(i)}$: 송출단에서 i구간 말단까지의 중부하시 전압강하 (변압기탭 종료점)
- $(V)_{\pi}$: 구간 i에서 사용되고 있는 주상변압기 탭
- V_0 : 주상변압기 2차 정격전압 (230V)
- V_d : 주상변압기 직하 수용가까지의 저압부 최소 전압강하 (주상변압기 + 인입선의 최소치)
- V_e : 배선선 말단의 수용가까지의 저압부 최대 전압강하 (주상변압기 + 저압배전선 + 인입선)

2.2 송출전압 조정영역도의 작성법

송출전압 조정영역도는 전기의 식 1과 식 2를 기준으로 작성할 수 있다. 식 3에서는 V_d 가, 식 4에서는 V_e 가 일정하므로, f_h 에 비례하는 경우, 이 식은 f_h 에 관한 일차식이 되며(직선), 그림 3에 나타낸 바와 같이 f_h 가 0%인 경우의 송출전압 상한치와 하한치의 종점 P1, P2와 f_h 가 100%의 송출전압 상한치의 종점과 하한치의 종점 Q1, Q2를 알 수 있다면 쉽게 그림을 그릴 수 있다. 시작점 P1, P2는 식 3과 식 4에 $f_h=0$ 을 대입하고, 종점 Q1과 Q2는 식 3과 식 4에 $f_h=1$ 로 대입하여 구할 수 있다. 또한, 최종적으로 얻어진 영역의 범위 이내에서 부하율 0~100[%] 사이에 직선을 그리는 경우, LDC방식에 의한 조정으로 모든 수용가단 전압을 규정치 이내로 유지할 수 있게 되며, 그 직선을 LDC의 정정치로 할 수가 있다. 즉 부하율 0[%] 때의 송출전압이 기준전압, 부하율 100[%]와 0[%]의 송출전압의 차가 전압 일정점까지의 전압강하가 된다.

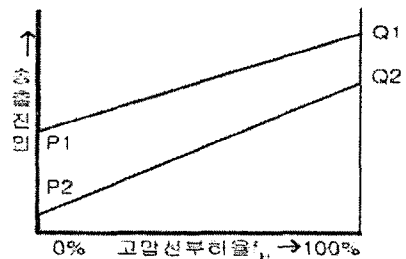


그림 2. 송출전압 조정영역도

2.3 LDC방식에 의한 정정치 계산법

각각의 부하율에 따른 송출전압 조정영역도를 작성해 송출전압의 상한치와 하한치의 편차가 가장 적은 일차곡선을 최소자승법을 이용해 구하면 그 곡선은 $V_{send} = V_0 + Z \times I_0(t)$ ---(3)로 나타낼 수 있다. 대상선로에서 송출전압의 상한값과

하한값이 일차곡선의 형태이므로 반값을 취하여 일차곡선을 만들었다. 여기서 구해진 Z와 Io를 조작회로에 설정하면 부하율에 따라 변하는 통과전류에 의해 계통의 전압강하가 보상이 되어, 수용가단 전압을 규정치내로 유지할 수가 있다.

3 최적 전압조정방안

3.1 최적 전압 보상을

LDC 방식에 의한 선로전압조정장치의 송출전압 결정문제는 각 수용가의 전압이 합리적인 분포가 되도록 전압조정 요소를 구하는 것으로, 이 요소는 배전계통의 등가적인 전압강하 특성을 나타낸다. 즉, 먼저 시간에 따라 변화하는 이상적인 최적 송출전압(최적 전압보상율)을 결정하고, 이것과 총 부하전류와의 상관관계를 통계적인 수법을 이용하여 최적 전압조정 요소를 구한다.

송출전압의 결정문제는 선택되어진 가장 가혹한 조건의 피더의 특정 지점(최대와 최소전압점)을 가능한 표준전압(220V)의 근방에 유지시키도록 최적 전압보상율을 구하는 것이 된다. 이 문제는 다음 식과 같이, 등가적으로 선로전압조정장치 적하의 수용가 전압과 규정전압의 상한치(233V), 하한치(207V)와의 차의 제곱을 최소화시키는 문제로 정식화시킬 수 있다.

$$\text{Min } J(t) = \{ V_{1\text{max}}(t) - V_1(t) \cdot X_{\text{mtr}} / R_{\text{mtr}} \}^2 + \{ V_1(t) \cdot X_{\text{mtr}} / R_{\text{mtr}} - V_{1\text{min}}(t) \}^2 \quad \text{--- (4)}$$

$$\text{Subj. to, } V_{1\text{max}}(t) = V_{\text{max}} \quad \text{--- (5)}$$

$$V_{1\text{min}}(t) = V_{\text{min}} \cdot V_1(t) / V_2(t) \quad \text{--- (6)}$$

여기서, t : 시간대,

V₁(t), V₂(t) : SVR 직하 및 말단의 수용가전압,
V₁max(t), V₁min(t) : SVR 직하로 환산된 규정전압의 상한치

V_{max} : 규정전압의 상한치

V_{min} : 규정전압의 하한치

R_{mtr} : SVR의 전압보상율

X_{mtr} : SVR의 최적 전압보상율

여기에서는 상기 문제의 간략화와 계산의 오차를 피하기 위하여, SVR 직하와 말단의 수용가전압이 고압선로의 전압강하에 의하여 비례적으로 변화한다는 사실에 주목하여, 말단의 수용가전압의 변동특성을 등가적으로 SVR 직하의 값으로 환산하였다. 즉, (5) 식과 (6) 식은 SVR 직하 지점에서 바라본 새로운 규정전압의 상한치를 나타낸 것으로, 상한치는 전압변동에 관계없이 일정하지만, 하한치는 직하에서 말단까지의 전압강하에 의하여, 시간과 함께 변화하는 특성을 가지고 있다.

따라서, 상기 문제에 대한 최소화 조건(dJ / dX_{mtr} = 0)에 의하여, 각 시간대의 최적 전압보상율은 다음식과 같이 구해진다.

$$X_{\text{mtr}} = R_{\text{mtr}} \cdot \{ V_{1\text{max}}(t) - V_{1\text{min}}(t) \}^2 / 2V_1(t) \quad \text{--- (7)}$$

3.2 최적 전압 조정요소

선로전압조정장치의 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 (8)와 같이 근사식으로 나타낼 수 있다. 따라서, 전압조정 요소의 결정문제는 이상적인 최적송출전압분포의 편차를 최소화하도록 식 (8)의 계수를 구하는 문제로 되어 최소화수법에 의해 식 (9)과 같이 정식화할 수 있다.

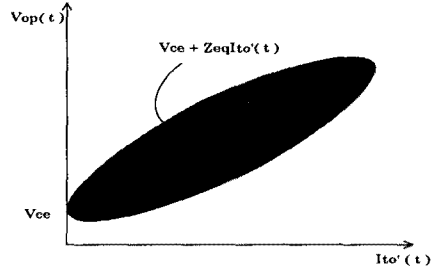


그림3 최적송출전압의 분포 특성

$$V_{\text{opt}}(t) = V_{\text{ce}} + Z_{\text{eq}} \cdot I_{\text{to}}'(t) \quad \text{--- (8)}$$

$$\text{Min } q = \sum_{t=1}^T \{ V_{\text{opt}}(t) - (V_{\text{ce}} + Z_{\text{eq}} \cdot I_{\text{to}}'(t)) \}^2 \quad \text{--- (9)}$$

여기서, T : 전체 시간대

V_{opt}(t) : X_{mtr}에 의한 최적 송출전압

V_{ce} : 부하중심점의 전압

Z_{eq} : 등가임피던스

I_{to}'(t) : SVR을 통과하는 총 부하전류

식 (8)을 최소화(∂q/∂Z_{eq} + ∂q/∂V_{ce} = 0)하여, 전체 고찰기간의 최적 전압조정요소(Z_{eq}, V_{ce})를 구하면 다음식과 같다.

$$Z_{\text{eq}} = \{ \sum_{t=1}^T I_{\text{to}}'(t) \cdot \sum_{t=1}^T V_{\text{op}}(t) - T \cdot \sum_{t=1}^T I_{\text{to}}'(t) \cdot V_{\text{op}}(t) \} / \{ (\sum_{t=1}^T I_{\text{to}}'(t))^2 - T \cdot \sum_{t=1}^T (I_{\text{to}}'(t))^2 \} \quad \text{--- (10)}$$

$$V_{\text{ce}} = \{ \sum_{t=1}^T I_{\text{to}}'(t) \cdot V_{\text{op}}(t) - Z_{\text{eq}} \cdot \sum_{t=1}^T (I_{\text{to}}'(t)) \} \quad \text{--- (11)}$$

4. 시뮬레이션 및 결과 분석

4.1 모델계통 및 제조건

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

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

③ 저압측의 전압강하 배분은 주상변압기와 인입선, 저압선로의 최대 전압강하를 각각 4V, 4V, 8V로 상정한다.

④ 고압배전선로의 전압강하를 계산하기 위하여, 가우스 사이델법(Gauss-Seidel Method)을 이용한 조류계산법을 이용하였다.

⑤ SVR의 설치지점은 그림 4의 10번 지점으로 상정하였으며, 운용패턴은 기존의 전압조정방안과 최적 운용방

안을 비교한다.

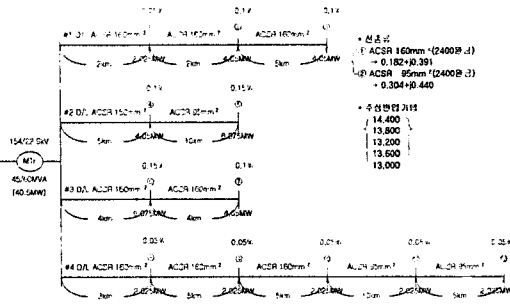


그림 4. 22.9KV 모델 배전계통

Feeder Number	Section Number	Node Number		Impedance		Length (km)	Pole Tr. Tap	Load(와)
		From	To	R(Ω/km)	X(Ω/km)			
1	1	0	1	0.182	0.391	2.0	22900/230	5ㄱ
	2	1	2	0.182	0.391	2.0	22900/230	10ㄱ
	3	2	3	0.182	0.391	5.0	22900/230	10ㄱ
2	4	0	4	0.182	0.391	5.0	22900/230	10ㄱ
	5	4	5	0.304	0.440	10.0	21400/230	15ㄱ
3	6	0	6	0.182	0.391	4.0	22900/230	15ㄱ
	7	6	7	0.182	0.391	4.0	22900/230	10ㄱ
4	8	0	8	0.182	0.391	3.0	22900/230	5ㄱ
	9	8	9	0.182	0.391	5.0	22900/230	5ㄱ
	10	9	10	0.182	0.391	5.0	22900/230	5ㄱ
	11	10	11	0.304	0.440	10.0	21400/230	5ㄱ
	12	11	12	0.304	0.440	5.0	21400/230	5ㄱ

표1 배전계통 구간데이터

4.2 시뮬레이션 결과 및 평가

상기의 시뮬레이션 조건을 기준으로 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 6과 그림 7에서 알 수 있듯이 두 가지 방법의 시간대별 전압이 수용가 규정전압(220±13V)안에 유지되지만 방식2가 220V에 더 가까운 근방으로 유지됨을 알 수 있다. 그림 8에서도 볼 수 있듯이 모든 시간대별의 최적전압조정방안의 편차가 더 적은 것을 알 수 있으며, 따라서 최적전압조정방안이 더 합리적임을 알 수 있다.

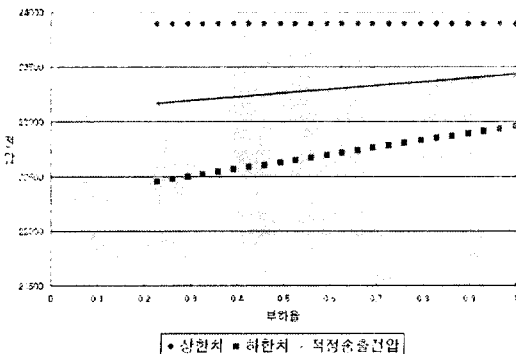


그림 5. 기존 전압조정방안의 송출전압조정영역도

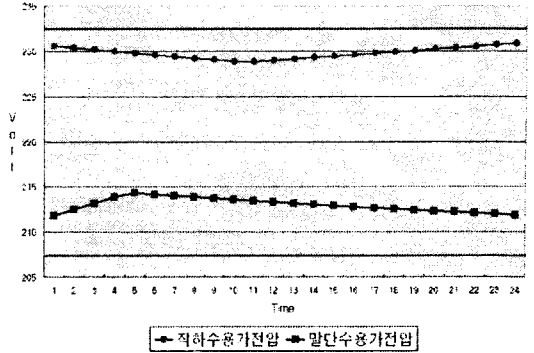


그림 6. 기존 전압조정방안을 이용한 수용가 전압특성

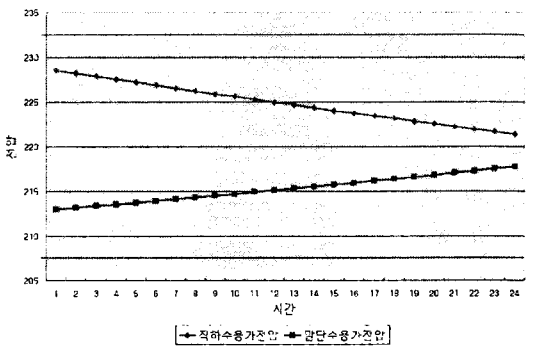


그림 7. 최적 전압조정방안을 이용한 수용가 전압특성

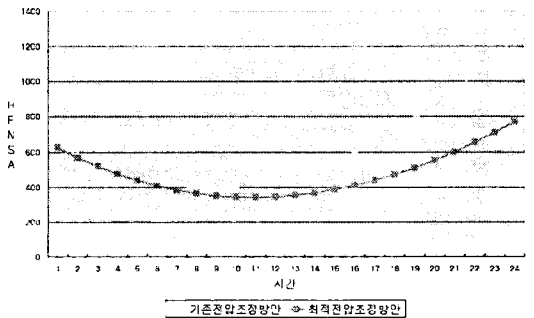


그림 8. 각 방식의 평가지표의 비교

[참 고 문 헌]

[1] 이은미, 노대석 "배전계통의 전압관리 현황과 개선방안에 관한 연구", 2002 대한전기학회 춘계학술대회 논문집, 2002. 5
 [2] 이은미, 노대석 "배전계통에 있어서 최적 송출전압에 관한 연구", 2002 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 2002. 7
 [3] 이은미, 노대석 "고압선로의 선로조정장치(SVR)이 운용에 관한 기초연구" 2002 대한전기학회 추계학술대회 논문집, 2002.9
 [4] 이은미, 노대석 "고압선로의 선로조정장치(SVR)의 최적운용에 관한 연구", 2003 대한전기학회 춘계학술대회 논문집, 2003.5
 [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, 1997년3월