

배전선로의 적정 콘덴서 운용 연구

전영수, 장정태
한국전력공사 전력연구원

A Study of the Optimal Condenser Operation in Distribution System

Young-Soo Jeon, Jeong-Tae Jang
Korea Electric Power Research Institute

Abstract - For economic operating of distribution system, utility has to minimize the loss in distribution line by controlling reactive power and power factor. This paper presents calculation of reactive power in distribution line, estimation of the condenser capacity according to distance, and computation of optimal location and proper condenser capacity.

1. 서 론

그동안 우리나라는 배전계통의 무효전력 관리 필요성이 절실하게 요구되지 않아 설치한 콘덴서를 일부 운휴시키기도 하지만 무효전력을 해석하여 적정한 용량으로 관리하는 것이 선진기술 적용 측면에서 요청된다. 따라서 현재 우리나라 배전계통의 역할 실패를 알아보았으며 역할 개선용 콘덴서 부설시 어느 위치에 얼마의 용량을 설치해야 되는지 고찰하였다.

2. 본 론

2.1 배전선로의 역할 실패

배전선로 역할 실패를 분석하기 위하여 대도시, 중도시, 소도시, 농촌, 어촌으로 지역을 구분하고 Power Platform(Dranetz Technology Inc.)을 이용하여 24시간 역률을 측정한 결과 표 2-1 및 그림 2-1~그림 2-5와 같다.

표 2-1 역률 측정 선로 및 측정결과

구분	지역	측정결과(%)
대도시	영등포	72-82
중도시	구리	80
	제주	81
소도시	동울산	88
	광양	80
농촌	광양	84
	구례	83
어촌	동울산	84
	포항	90

2.1.1 대도시 특성

평일 24시간 역률 변화는 88.7~95.1%이었고, 중부하 시간대인 18시는 88.7%로 가장 낮았으며 14~17시도 89.2~90.0%로 낮은 편이었다. 한편 오전(9~12시)의 역률은 90.4~91.4%로 양호한 편이었고, 1~7시는 94%이상으로 높은 편이었다.

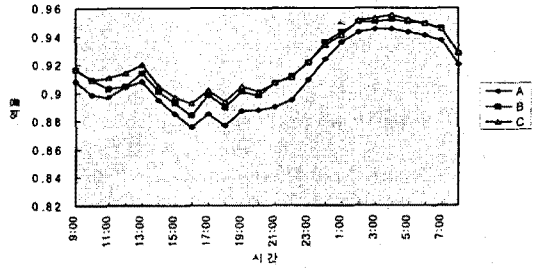


그림 2-1 영등포지역 대도시 특성

2.1.2 중도시 특성

역률의 변화 폭은 크지 않으나 77.0~83.1%로 낮은 편이었고 특히 22시의 역률은 77.0%로 최저치이다. 한편, 심야(3~5시)의 역률은 76.5~78.4%이었고, 점심시간을 제외하고는 오전 77.9~79.7%, 오후 78.5~79.7%로 큰 변화는 없었다.

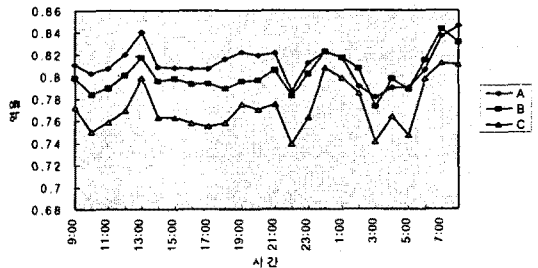


그림 2-2 구리지역 중도시 특성

2.1.3 소도시 특성

광양지역의 경우 88.2~96.9%로 변화가 큰 편이었으며 중부하 시간대인 20시의 역률은 88.2%로 가장 낮았다. 한편, 낮시간대는 변화가 적으며, 1~6시의 역률이 95.1~96.9%로 높았다.

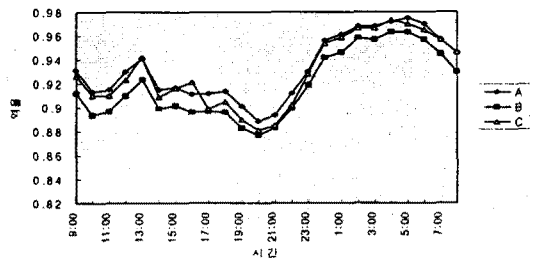


그림 2-3 광양지역 소도시 특성

2.1.4 농촌 특성

구례지역의 경우는 89.9~97.4 %의 역률로 좋은 편이며 단지 20시에 89.9%로 다소 낮았지만 우려할 값은 아니다. 각 시간대별로 살펴보면 야간시간대 90.8~92.6 %, 낮시간대 90.8~91.9 %, 심야시간대 94.4~96.9 %로 나타났다.

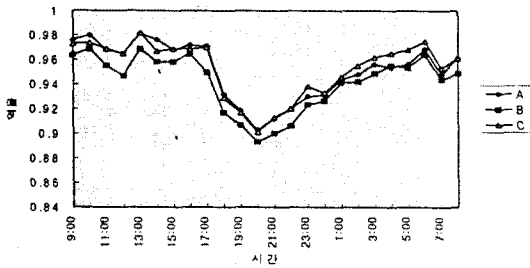


그림 2-4 구례지역 농촌 특성

2.1.5 어촌 특성

포항 대보만 지역의 경우는 공장이 길고 부하가 적어 왜란티 효과가 커서 심야시간대는 현저한 진상 역률을 나타내고 있다.

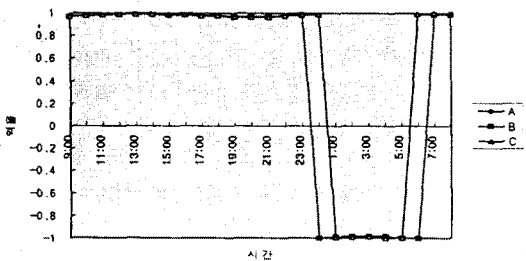


그림 2-5 포항지역 어촌 특성

2.2 최적 콘덴서 용량 산정

콘덴서의 적정용량을 산정하기 위해서는 조류계산을 통하여 배전계통의 상태 파악이 선행되어야 하나 배전계통은 각 부하 모선의 유효전력과 무효전력에 관한 정보가 거의 없다. 따라서 본 논문에서는 변전소의 인출 값과 일부 모선의 측정치에 의한 기지 값을 반영하면서 각 모선의 부하를 산정하고 이러한 부하배분의 알고리즘으로부터 배전조류계산을 수행하여 계통의 상태를 파악하고 이로부터 손실감도 지표인 λ 파라미터를 고찰하여 전력제어 콘덴서의 최적위치와 용량을 산정할 수 있도록 하였다.

2.2.1 부하배분

부하단 변압기의 합성용량 (kVA)과 변전소의 $|V|$, P , Q , φ , 각 부하모선의 역률 φ_i (주어지지 않은 경우는 90%로 가정)의 조건으로부터 배전계통의 조류계산을 하기 위한 부하배분은 다음 식으로 정의한다.

$$P_S = \sum P_i + P_{loss} \quad (2-1)$$

$$Q_S = \sum Q_i + Q_{loss} \quad (2-2)$$

P_S : 총공급 유효전력, Q_S : 총공급 무효전력

P_i : i 구간의 유효전력, Q_i : i 구간의 무효전력

P_{loss} : 유효분 손실, Q_{loss} : 무효분 손실

2.2.2 조류계산(3상 조류계산)

배전계통은 각 상별로 부하가 평형상태가 아니므로 등

가적 단상 조류계산보다는 삼상 조류계산을 해야 한다.

① 용량이 가장 큰 변전소를 슬랙모선으로 정하고 그 이외의 변전소는 전압지정모선으로 정한다. 그리고 부하모선은 용량별 부하배분법에 의해 배분한다.

② 조류계산을 하기 위한 각 모선의 전력방정식은 다음과 같다

$$\vec{I}_{BUS} = [Y_{BUS}] \times \vec{V}_{BUS} \quad (2-3)$$

\vec{I}_{BUS} : 모선의 전류 벡터,

\vec{V}_{BUS} : 모선의 전압 벡터

$[Y_{BUS}]$: 모선의 어드미턴스 행렬

③ 뉴턴-랍슨법에 의한 전력의 편차 방정식은 다음과 같다.

$$\Delta P_k = P_k - V_k \sum_{m=1}^n V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \quad (2-4)$$

$$\Delta Q_k = Q_k - V_k \sum_{m=1}^n V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \quad (2-5)$$

$P_k + jQ_k$: k모선에서의 주어진 전력

V_k : k모선에서의 전압의 절대치

θ_k : k모선에서의 전압의 위상각

$G_{km} + jB_{km}$: 모선 어드미턴스 행렬의 (k, m)원소

2.2.3 콘덴서 위치와 용량

보상설비의 투입은 전적으로 계통해석을 근거로 이루어져야 하므로 보상설비 투자효과를 위해 감도를 계산한다.

$$P(V, \theta) = P^{SPEC} \quad (2-6)$$

$$Q(V, \theta) = Q^{SPEC} \quad (2-7)$$

$$P_k(V, \theta) = V_k \sum_{m=1}^n V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \quad (2-8)$$

$$Q_k(V, \theta) = V_k \sum_{m=1}^n V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \quad (2-9)$$

P^{SPEC} , Q^{SPEC} : 모선지정전력

조류계산 결과로부터 부하 변화에 따른 계통 손실변화를 추적하면 비선형 제약조건이 있는 최적화 문제로 모형화할 수 있다. 이때 목적함수는 계통의 유효전력손실이 되고 제약조건으로는 조류계산식이 된다.

Minimize P_{LOSS}

$$s.t. \quad P(V_D, \theta) = P^{SPEC}$$

$$Q(V_D, \theta) = Q^{SPEC} \quad (2-10)$$

여기서 V_D 는 부하모선의 전압을 나타낸다. 이것을 라그랑주 함수로 이용하여 다음과 같이 정의한다.

$$L = P_{LOSS}(V_D, \theta) + \lambda_P^T [P(V_D, \theta) - P^{SPEC}] + \lambda_Q^T [Q(V_D, \theta) - Q^{SPEC}] \quad (2-11)$$

여기서 L 과 P_{LOSS} 는 스칼라량이며 λ_P , λ_Q , P , Q , P^{SPEC} , Q^{SPEC} 은 $n \times 1$ 의 벡터량이고 라그랑주 함수를 정의하면 본래 제약조건이 있는 최적화 문제가 단순히 제약조건이 없는 라그랑주 함수의 최적화 문제로 등가화된다. 제약조건이 해제된 등가 라그랑주 함수의 최적화 문제는 다음과 같이 최대화 및 최소화 두 과정을 포함

하게 된다.

$$\underset{[\lambda_p, \lambda_Q]}{\text{Maximize}} \underset{[V_D, \theta]}{\text{Minimize}} L[V_D, \theta, \lambda_p, \lambda_Q] \quad (2-12)$$

변수 $[V_D, \theta]$ 에 대해서는 최소화 문제가 되고 라그랑주 승수 $[\lambda_p, \lambda_Q]$ 에 대해서는 최대화 문제로 표현되며 L 이 최적점에 도달하였을 경우 다음과 같이 최적조건이 성립한다.

$$\left[\frac{\partial L}{\partial \theta} \right] = \left[\frac{\partial P_{LOSS}}{\partial \theta} \right] + \left[\frac{\partial P}{\partial \theta} \right]^T \cdot \lambda_p + \left[\frac{\partial Q}{\partial \theta} \right]^T \cdot \lambda_Q = 0 \quad (2-13)$$

$$\left[\frac{\partial L}{\partial V_D} \right] = \left[\frac{\partial P_{LOSS}}{\partial V_D} \right] + \left[\frac{\partial P}{\partial V_D} \right]^T \cdot \lambda_p + \left[\frac{\partial Q}{\partial V_D} \right]^T \cdot \lambda_Q = 0 \quad (2-14)$$

$$\left[\frac{\partial L}{\partial \lambda_p} \right] = P(V_D, \theta) - P^{SPEC} \quad (2-15)$$

$$\left[\frac{\partial L}{\partial \lambda_Q} \right] = Q(V_D, \theta) - Q^{SPEC} \quad (2-16)$$

최적조건은 본래의 변수 $[V_D, \theta]$ 와 제약조건에 의해 도입된 변수 $[\lambda_p, \lambda_Q]$ 의 두 가지로 분류됨을 알 수 있으며 도입된 변수 $[\lambda_p, \lambda_Q]$ 의 물리적 의미를 살펴보면, 본래의 전압변수는 실제계통의 운전변수를 의미하고, 제약조건에 의해 도입된 변수 $[\lambda_p, \lambda_Q]$ 는 모선시정 전력 P^{SPEC} , Q^{SPEC} 에 대하여 미분한 값이 된다.

$$\left[\frac{\partial L}{\partial P^{SPEC}} \right] = -\lambda_p \quad (2-17)$$

$$\left[\frac{\partial L}{\partial Q^{SPEC}} \right] = -\lambda_Q \quad (2-18)$$

즉, 라그랑주 함수 λ_Q 는 모선 무효전력에 대한 미분이다. 이는 모선 무효전력이 단위량 증가할 때의 라그랑주 함수의 증가분을 의미한다.

2.3 사례연구 및 분석

2.3.1 조건

다음과 같이 광양 지역을 선정하였는데 모든 선로는 3상 선로로 구성되어 있고 각 노드의 부하데이터는 표 2-2와 같다.

표 2-2 각 노드의 부하 데이터

번호	유형	부하(1MW, 1MVAR base)					
		A상		B상		C상	
		유효전력	무효전력	유효전력	무효전력	유효전력	무효전력
1	0	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
2	2	0.0915	4.43154E-02	0.0915	4.43154E-02	0.0915	4.43154E-02
...
32	2	0.002025	9.80752E-04	0.002025	9.80752E-04	0.002025	9.80752E-04
33	2	0.00864	4.18454E-03	0.00864	4.18454E-03	0.00864	4.18454E-03
34	2	0.012735	6.16784E-03	0.012735	6.16784E-03	0.012735	6.16784E-03
35	2	0.01773	8.58703E-03	0.01773	8.58703E-03	0.01773	8.58703E-03
36	2	0.01233	5.97169E-03	0.01233	5.97169E-03	0.01233	5.97169E-03

표 2-3 주변압기 사용용량

번호	사용용량(1MW, 1MVAR base)					
	A상		B상		C상	
	유효전력	무효전력	유효전력	무효전력	유효전력	무효전력
1	1.4940532	0.5753312398	1.5726432	0.6765629057	1.4729405	0.5853813145
		69486		92034		80291

2.3.2 최적위치 선정

부하배분의 알고리즘으로부터 배전조류계산을 수행하여 계통 상태를 파악하고 전압안정도 지표(λ 파라미터)값으로 정의하는데 전압안정도 지표값이 가장 높은 33번 노드가 전력 콘덴서를 투자할 최적의 위치가 된다.

표 2-4 조류계산 결과

번호	전압(크기)		
	A상의 전압 크기	B상의 전압 크기	C상의 전압 크기
1	1.00000000	1.00000000	1.00000000
2	0.9965142	0.99611913	0.99651285
...
32	0.97541888	0.97263593	0.97540571
33	0.97517757	0.97236722	0.97516424
34	0.97903663	0.97666291	0.9790238
35	0.97926061	0.97691203	0.97924794
36	0.97925365	0.97690439	0.97924097

표 2-5 광양계통의 각 노드의 전압 안정도 지표값

번호	λ_Q	번호	λ_Q
1	-2.5688e-042	33	0.0501632
2	0.0071414	34	0.0427418
...	...	35	0.0423039
32	0.0496875	36	0.042313

2.3.2 콘덴서 투자

33번 노드에 대하여 투입할 콘덴서 양을 변화시켜 전로손실량 감소 포화상태까지 계산해 보면 15 kVAR이다. 이 값을 적용하여 조류를 해석해 보면 각 노드의 전압이 크게 개선됨을 알 수 있다.

표 2-6 33번 노드에 투입된 콘덴서의 양

번호	투입량(1MVAR base)		
	A상	B상	C상
33	0.015	0.015	0.015

표 2-7 콘덴서 투입후 광양계통의 조류계산 결과

번호	전압(크기, 위상각)		
	A상의 전압 크기	B상의 전압 크기	C상의 전압 크기
1	1	1	1
2	0.996558	0.996163	0.996557
...
32	0.976255	0.973475	0.976242
33	0.976112	0.973305	0.976099
34	0.979221	0.976848	0.979208
35	0.979445	0.977098	0.979433
36	0.979438	0.97709	0.979425

3. 결론

본 논문에서는 부하변동이 심한 배전계통에서 최소한의 데이터로 계통의 적정부하를 선정하기 위한 부하배분 알고리즘을 정립하였으며, 상별 불평형 특성을 고려한 3상 조류계산을 수행하여 보다 정확한 계통 상태를 해석하였고, 계통의 불안정성을 반영하는 전압안정도 지표 계산을 이용하여 최적 콘덴서 투입점 및 용량을 찾아냈다.

(참고 문헌)

- [1] David I-Ho Sun, "Distribution System Loss Analysis and Optimal Planning", the Univ. of Texas Arlington, pp. 11-60, 1980
- [2] 장정태, 다연계 배전계통의 상시 개로 스위치 해석(박사논문), 1997
- [3] 장정태의, "배전선로의 무효전력 최적관리에 관한 연구(연구보고서)", 전력연구원, 1996
- [4] 김건중의, "공급신뢰도를 고려한 배전계통의 전압강하 해석", 대한전기학회 추계학술대회, 1980