

부하역율 분석 및 적용에 관한 연구

김태욱, 장재원, 권태원  
한국전력공사

A Study on Analysis and Application of Power Factor

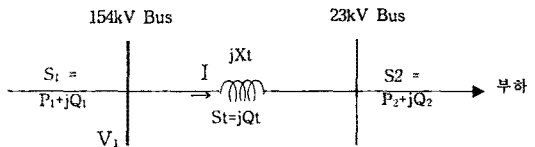
Taeok Kim, Jaewon Chang, Taewon Kwon  
Korea Electric Power Corporation

**Abstract** - 전력계통 해석의 정밀도 향상을 위해서는 배전용변압기 1차측 기준의 정확한 부하역율 데이터 입력이 요구되나, 현재 역율산정을 위한 유·무효전력 측정설비가 변압기 2차측에만 설치되어 변압기 자체에서 소모되는 무효전력에 대한 보다 정확한 고려방법 모색이 필요하다. 이와 관련하여 본 고에서는 변압기 OLTC 변화에 따른 소모 무효전력 변화량 고려방법, 변압기 2차측 유·무효전력 측정치 및 조상설비 운전실적 등 제반 요소를 고려한 변압기 1차측 기준의 역율 산정방법을 제시하고, 현재 우리계통에서 운전되고 있는 154kV 전 변전소 전 변압기 및 154kV 직거래고객에 대하여 계절별, 요일별, 시간대별로 총 44개 케이스의 부하역율 특성분석 결과를 이용 계통해석시 적용되는 부하데이터의 정밀도 향상방안과 부하역율 변경 적용시 계통해석 결과에 미치는 영향 등에 대한 우리나라 실 계통 대상 모의 결과를 다루었다.

자료와 변압기 손실 불고려시의 유효전력 자료는 측정을 통하여 얻을 수 있으나 변압기에서 소모되는 무효전력 데이터는 측정치로부터 직접 얻을 수는 없으므로 가용한 데이터를 이용 변압기에서 소모되는 무효전력을 산출해야 한다.

2.1.1 변압기 소모 무효전력 산출

변압기 2차 측정 데이터 및 변압기 1차 전압 등 가용한 데이터를 이용하여 변압기별 소모 무효전력을 산출하는 과정은 아래와 같다.



(그림1)

1. 서 론

그간 전력계통에서의 부하역율은 주로 손실 감소를 위한 수단으로 관리되어 우리나라의 경우 지상역율 90% 이하시는 1% 감소시마다 기본요금의 1%를 요금에 증액하고, 90%~95%까지는 1% 증가시마다 기본요금의 1%를 감액해주고 있다. 그러나, 최근 전력계통의 대형화 및 중주류 설비의 증가 등으로 계통내부에서 소모되는 무효전력 급증에 따라 계통전압 관리차원에서 부하역율 관리의 중요성이 새로이 부각되고 있다.

한편, 현재 계통해석시 적용하고 있는 부하자료(유·무효전력 등)는 계통해석 프로그램 제약 및 데이터 처리 소요시간 대비 효율성 등을 고려하여 154kV 모선단에서의 자료를 이용하고 있으나, 실제에는 변압기 2차측(주로 22.9kV측)에만 계기가 부착되어 있어 변압기 1차측(154kV측)기준의 정확한 무효전력 값을 산정하기가 어려워 그간 계통운영의 경험에서 얻어진 근사치를 적용하고 있어 계통 해석의 정밀도 향상을 위해서는 변압기 2차측에서 측정되는 무효전력 등 가용한 데이터를 이용하여 변압기 1차측 기준의 부하데이터 환산 방법 강구가 긴요하다. 따라서, 본 고에서는 154/23kV 배전용 변압기에서 소모되는 무효전력을 산정하기 위한 방법에 대하여 살펴보고, 2001년 현재 우리계통에서 운전되고 있는 154kV 전 변전소, 전 변압기 및 154kV 직거래고객에 대하여 각 계절별, 요일별, 시간대별로 측정된 총 44개 케이스 분석을 통해 우리나라 계통역율의 운영 실태와 계통역율 분석결과 변경 적용 전·후 계통해석 정밀도에 미치는 영향 등을 비교해 보고자한다

2. 본 론

2.1 154kV 모선단 기준 역율 산정방법

154kV 모선단 기준 역율을 산정하기 위해서는 각 변전소별 변압기 1차측 및 154kV 직거래고객으로 공급된 유·무효전력 값이 필요한데 직거래고객 유·무효전력

위 [그림1]에서 기 측정된 변압기 1차측 전압, V1과 변압기 2차측 유·무효전력, P2, Q2 및 변압기 임피던스를 이용하여 변압기 1차측의 유·무효전력을 산정해보면

$$S1 = \sqrt{3} V1 \times I^* = P1 + jQ1$$

$$I^* = \frac{P1 + jQ1}{\sqrt{3} V1}, I = \frac{P1 - jQ1}{\sqrt{3} V1}$$

$$St = Pt + jQt = \sqrt{3} V1 \times I^* \\ = \sqrt{3} \times \sqrt{3} \times jXl \times I \times I^* \\ = jQt (\because Pt=0)$$

$$jQt = 3 \times jXl \times \frac{(P1 + jQ1)}{\sqrt{3} \times V1} \times \frac{(P1 - jQ1)}{\sqrt{3} \times V1} \\ = jXl \times \frac{P1^2 + Q1^2}{V1^2} = jXl \times \frac{P1^2 + (Q2 + Qt)^2}{V1^2}$$

양변에  $-jV1^2$ 을 곱하면,

$$V1^2 \times Qt = Xl \times (P1^2 + Q2^2 + Ql^2 + 2Q2 \times Qt) \\ Xl \times Ql^2 + (2 \times Xl \times Q2 - V1^2) \times Qt + Xl \times (P1^2 + Q2^2) = 0$$

따라서, 변압기에서 소모되는 무효전력은

$$Qt = \frac{-(2XlQ2 - V1^2) \pm \sqrt{(2XlQ2 - V1^2)^2 - 4Xl^2(P1^2 + Q2^2)}}{2Xl}$$

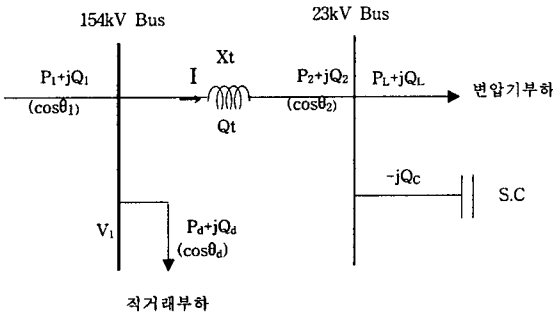
여기서, 보다 정확한 변압기 임피던스 값 계산을 위해 변압기별 기준 %Z 자료와 조사당시 변압기 OLTC 운전 Tap 위치 자료를 적용할 필요가 있는데 각 제작사별 OLTC Tap 변동에 따른 임피던스 변화량을 시험치를 기준으로 산출한 결과 아래 [표1]에서와 같이 평균적으로  $\Delta\%Z = 0.096\%/1Tap$ 를 얻었다.

구분	현체계			효성계			비고
	1	11	21	1	11	21	
Tap위치	15.392	14.200	13.340	15.975	15.233	14.190	시험성적서
%Z(@45MVA)	0.1026%/1Tap			0.089%/1Tap			
%Z변화율	0.096%/Tap						평균치

[표1] 제작사별 Tap 변화에 따른 %Z 변화량

### 2.1.2 154kV 모선단 기준 역율 산정

154kV측에서 역율산정 과정을 설명하기 위해 대표적인 154kV 변전소 개요도를 [그림 2]에 나타내었다.



[그림2]

2.1.1절에서 산출한 변압기 소모 무효전력과 기 측정된 데이터를 적용하여 154kV 모선단 기준의 역율을 아래와 같이 계산할 수 있다

$$\text{유효전력, } P_1 = \sum P_L + \sum P_d = \sum P_2 + \sum P_d$$

$$\text{무효전력, } Q_1 = \sum Q_t + \sum Q_L + \sum Q_d$$

$$= \sum Q_t + \sum Q_2 + \sum Q_c + \sum Q_d$$

※ 여기서 P1, Q1, Q1은 계산치, P2, Pd, Q2, Qc, Qd는 실측치임

위의 식들을 이용하면, 154kV 모선단기준 역율,

$$\text{Cos}\theta_1 = \frac{P_1}{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2}} \text{를 얻을 수 있다.}$$

### 2.2 부하역율 자료 조사분석

현재 우리가 계통해석시 적용하고 있는 부하역율의 오차 정도를 알아보기 위해 2001년에 154kV 전 모선을 대상으로 각 계절별, 요일별, 시간대별로 총 44회에 걸쳐 조사한 부하역율 관련자료를 대상으로 다양한 분석을 시행하였다.

#### 2.2.1 조사자료 내역

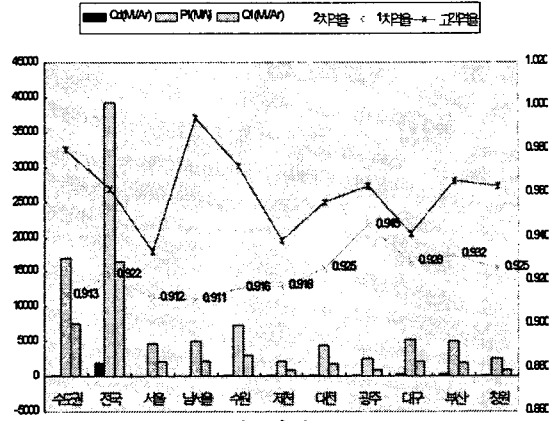
계절별	요일별	시간대별	조사자료 내역	비고
동계 춘계 추계	금, 토, 일요일 월요일	주간, 저녁, 심야, 새벽	○ 변전소별 1차측 전압 ○ 변압기 2차측 유·무효전력 ○ OLTC Tap, %Z, SC 상태	30회 (계절별 10회)
하계	평일 (화, 수, 목, 금) 토, 일요일 월요일, 기타	주간, 저녁, 심야 주간, 저녁, 심야 새벽, 피크시	○ 직거래고객 부하 ○ 송전선로 조류함	14회

[표1] 조사자료 내역

#### 2.2.2 하계주간 부하역율

계통해석시 가장 기본이 되는 하계피크 부하시의 부하역율을 지역별, 요일별, 부하종류별, 측정위치별로 분석

하여 아래와 같은 결과를 얻었다. 먼저 하계피크일 지역별 부하역율을 살펴보면 수도권 지역이 91.3% 정도로 가장 낮은 편이고, 광주지역이 94.5%로 가장 높게 나타났다. 지역별 유·무효전력 및 부하역율을 아래 [그림3]에 나타내었다.



[그림3]

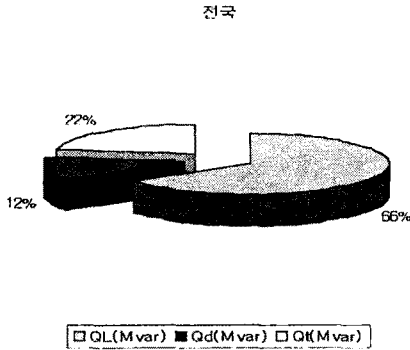
또, 하계주간 부하의 요일별 특성을 알아보기위해 분석한 결과 수도권은 평일 전요일 공히 91.3%였으며, 전국 평균은 92.5%로 나타나 요일별로는 큰 차이가 없었고, 전국부하에 대한 수도권의 무효전력 점유비는 46.6%로 유효전력 점유비 43.1%보다 높은 것으로 나타났다. 한편 하계피크시 부하종류별 및 측정위치별 부하역율 조사결과를 [표2]에 나타내었다.

관리처	부하실적 (MW)	① 변압기 2차역율	② 변압기 1차역율	③ 직거래고객 역율	1차측 합환산 역율	차이(kV)	
						①-②	③-②
서울	4,729	98.1	91.0	93.4	91.2	7.2	2.4
남서울	4,946	96.6	90.5	99.4	91.1	6.1	9.0
수원	7,312	98.2	90.3	97.2	91.6	8.0	6.9
제천	2,192	97.8	91.1	93.8	91.8	6.7	2.8
대전	4,524	98.9	91.8	95.6	92.5	7.1	3.8
광주	2,595	97.6	93.7	96.3	94.5	3.9	2.6
대구	5,300	100.0	92.4	94.1	92.8	7.6	1.7
부산	5,077	95.1	91.0	96.6	93.2	4.2	5.6
창원	2,452	97.9	91.3	96.3	92.5	6.6	5.1
수도권	16,987	97.8	90.6	98.0	91.3	7.2	7.4
육지	39,127	98.2	91.3	96.2	92.2	6.9	4.9

[표2] 측정위치별 부하역율

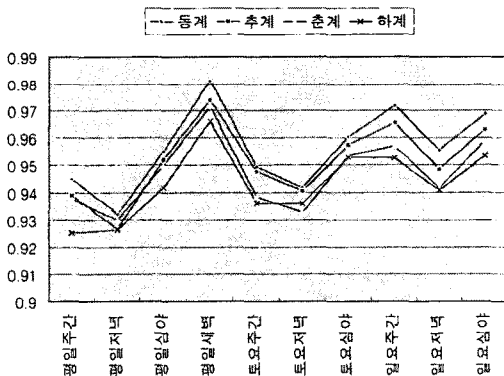
[표2]에서 알 수 있듯이 측정위치별 부하역율은 변압기 2차측이 가장 높고, 변압기 1차측이 가장 낮았으며, 부하종류별로는 154kV 직거래부하와 변압기 부하의 역율이 큰 차이는 없었으나 변압기 1차측 환산치와 직거래 고객 부하와는 역율은 약 4.9% 정도 차이가 있었고, 변압기 1-2차측 역율차는 6.9% 정도로 나타나 변압기 자체에서 소모되는 무효전력이 큰 것으로 나타났다. 한편 하계피크시 전국의 변압기 부하, 직거래부하, 변압기 자체소모 무효전력 구성비를 [그림4]에 나타내었다.

(그림4) 무효전력 구성비



(그림4)의 무효전력 구성비를 보면 변압기 자체소모 무효전력이 전체 무효분의 22%로 점유비가 매우 높은 것을 알 수 있으며, 특히 수도권 변압기 소모무효전력은 26%로 전국 평균치보다 높는데 이는 수도권 변압기의 이용율이 전국 변압기의 평균 이용율 보다 높은 것에 기인 된 것으로 보인다.

### 2.2.3 기타 부하역률 특성



(그림5)

계절별, 요일별, 시간대별로 변압기 1차측으로 환산된 부하역률 특성을 살펴보면 (그림5)에 나타난 바와 같이 계절별로는 동계에 부하역률이 가장 높고, 하계에는 가장 낮으며, 요일별로는 평일이 가장 낮고 일요일이 가장 높으며, 시간대별 부하역률 특성은 하계를 제외하고는 저녁시간대의 부하역률이 가장 낮고, 새벽 경부하시의 역률이 가장 높은 것으로 나타나 저녁 점등부하의 역률이 좋지않은 것으로 조사되었으며, 또한, 타 계절에서와는 달리 하계 주간부하의 역률은 현격히 저하된 것으로 나타났는데 이는 하계 주간 피크시간대의 부하증가에 따른 변압기 소모 무효전력의 상승과 저역률의 냉방부하 가동량 증가에 따른 것으로 분석되었다.

### 2.3 분석결과와 적용 전·후 해석결과 비교

현재 실계통 해석시 부하역률 적용은 하계 피크시 154kV 모선단을 기준으로 수도권은 90.5%, 전국은 91.0%로 하고 있으나 역률분석 결과는 수도권은 91.3%, 전국은 92.5%로 다소 높게 나타났다. 따라서, 본 절에서는 부하역률이 계통해석결과에 미치는 영향을 알아보기 위해 전력계통해석용 프로그램(PSS/E)을 이용하여 부하역률 분석결과와 적용 전·후의 계통손실, 주요 모선전압, 복상조류 한계량 차이 등에 대하여 비교하였다. 이 번에 적용된 케이스는 부하수준 46,000MW의

2002년 하계피크시 예상계통을 기준으로 Case1은 기존 부하역률을 적용하고, Case2는 154kV 모선별 부하역률 분석결과를 적용하여 검토한 것이다.

#### 2.3.1 계통손실 차이비교

부하역률 분석결과와 적용 전·후의 계통손실 비교결과 Case1이 758.5MW이고, Case2가 742.6MW로 부하역률 분석결과와 적용시 계통손실이 15.9MW 감소되는 것으로 나타났으며, 이를 손실계수(0.63), 평균 가격(50원/kWh)을 적용하여 연간 비용을 개선해 보면 부하역률 분석결과와 적용시 약 44억원이 절감되는 것으로 분석되었다.

#### 2.3.2 주요모선 전압차 비교

부하역률 분석결과와 적용 전·후 345kV 주요 모선의 전압 비교결과를 아래[표3]에 실었다.

모선명	모선전압(kV)		
	Case1	Case2	차 이
의정부	353	357	4
동서울	352	356	4
신시흥	344	346	2
신안성	353	357	4
화성	344	347	3
청원	344	347	3
신김제	348	352	4
신광주	350	353	3
선산	346	353	7
수도권평균	350	353	3
전체 평균	349	353	4

[표3] 분석결과와 적용 전·후 전압비교

위 [표3]에서와 같이 부하역률 분석결과와 적용 전·후 345kV 주요 모선의 전압차이는 수도권은 약3kV, 전국 평균치는 약4kV 정도 분석결과와 적용 후가 높게 나타났다.

#### 2.3.3 복상조류 한계차 비교

하계피크계통에서 복상조류 한계차 비교 결과 Case2가 Case1 보다 약330MW 정도 복상조류 한계치 상승이 가능한 것으로 나타났다.

## 3. 결 론

본 논문에서 제시한 변압기 1차측 전압, 변압기 임피던스, 2차측정 유·무효전력을 이용한 변압기 자체 소모 무효전력 계산식을 활용하면 그간 변압기 2차측정 데이터를 근거로 개략적으로 적용해오던 154kV 모선단 기준의 부하역률 값을 정확히 산정하여 적용할 수 있을 것이다. 또, 2.3절에 언급한 바와 같이 부하역률 분석결과와 적용 전·후 계통해석 결과에 작지 않은 차이가 있는 것으로 나타나 부하역률의 정확한 고려가 계통해석에 있어서 매우 중요한 요소임을 알 수 있다. 따라서, 전력계통의 안정성 확보를 위한 어느 정도의 여유는 고려해야 하지만 보다 경제적인 계통운영이 현안으로 대두되고 있는 현 시점에서 본 논문에서 제시한 방법이 하나의 대안이 되기를 기대하며, 앞으로는 조상설비계획과 부하역률 향상방안과의 상관관계 등 관련 연구를 수행할 예정이다.

#### (참 고 문 헌)

- [1] PTI "PSS/E Program Application Guide Vol I, II
- [2] 전력연구원, "전력계통 안정도 정밀해석을 위한 적정 부하 모델에 대한 연구", 2001.3