

콘덴서 제어회로를 이용한 배전용 변압기의 역률 개선에 관한 연구

(A Study for Improving the Power Factor of Distribution Transformer using Condenser Control Circuit)

이광직*

(Kwang-Jeek Lee)

Abstract

Daily use characteristics of apparent power supplied to distribution transformer can be separated into two different time zone of waking hours and sleeping hours. In sleeping hours, using amount of power is decreasing. The actual curve of power seemed to be quite similar to this kind of separation. Inserting a condenser into a circuit in each different time zone led to maximize power factor of the transformer. The compensating condenser's on/off time is controlled by hysteresis circuit utilizing op amp and power factor of the transformer was improved from 0.945 to 0.999. As a result, the average of current reduction was 2.53A per hour of transformer.

Key Words : Pole Tr., Power Factor, Reactive Power, Hysteresis Circuit

1. 서 론

일반 주택에서 사용되는 전기는 그 부하의 특성이 유도성일 경우에는 콘덴서를 이용하여 역률을 개선할 수 있다. 그러나 역률개선 장치를 설치하는데 다소의 비용이 필요할 뿐만 아니라, 역률이 개선되었다고 하더라도 실제로 전기 사용 요금에 절감이 되는 것은 아니다. 더불어 역률 개선 장치에 대한 기술적인

관리가 어렵다. 그러나 이를 일반 주택에 전기를 공급하는 배전용 변압기인 주상변압기(P.Tr) 또는 지상변압기(Pad.Tr)에 별도로 장착하여 관리한다면 기술적인 해결이 용이하고, 역률 개선의 목표를 달성할 수 있다. 단독 주택에 사용되는 배전용 변압기는, 그 규모가 대략 10kVA에서 150kVA 정도의 용량을 사용한다.

현재 국내에서 사용되는 배전용 변압기의 역률은 평균 90%~96% 이내로 파악되고 있다.

예를 들어 변압기의 역률이 96.5%인 경우 발생하는 무효전력 Q 는

$$Q = VI \times \sqrt{1 - 0.965^2} \quad (1)$$

단 : V = 변압기 2차 측 전압

I = 변압기 2차 측 전류

* 주저자 : 서울과학기술대학교 전자IT미디어공학과 교수

* Main author : Dept. of Electronics and IT Media Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Professor

Tel : 02-970-6466, Fax : 02-974-6123

E-mail : 09251wg@seoultech.ac.kr

접수일자 : 2013년 12월 13일

1차심사 : 2014년 2월 4일, 2차심사 : 2014년 2월 6일

심사완료 : 2014년 3월 11일

에 의해서 구할 수 있고, 이 무효전력이 주로 유도성분에 기인한 지상전력 이라면 이를 보상하기 위한 콘덴서 C의 용량은 식 (2)로 표시된다[1].

$$C = \frac{Q}{wV^2} \quad (2)$$

단 : w = 각주파수

2. 배전변압기의 사용특성과 콘덴서 보상 방법

표 1은 서울시 서초구 방배동의 변대주번호가 9921F531 이고, 용량 50kVA인 주상변압기의 일 시간 별 24시간의 사용 전력량 표시이다. 한전의 저압원격 검침 시스템의 계량장치로 측정된 데이터로 측정일은 2010년 8월 20일 이며 평균 역률은 0.965이고 평균 이용률은 35.0%이다.

표 1에는 일 전류를 적게 쓰는 야간 시간대를 휴면기로 간주하고 1차 콘덴서(표 1의 진상전력)를 투입하여 무효전류를 보상한 개선 역률과 개선 전류를 표시하였다. 그리고 사용량은 변압기 용량 대 실 사용 부하용량을 %로 표시한 것이며, A는 변압기의 3상중 하나를 표시한 것이다.

그림 1에는 표 1에 표시된 데이터 중 변압기의 일 24시간 전류 사용량을 도표로 표시하였다.

전류 곡선은 보통 가정의 단독 주택에 거주하는 사람의 일반적인 24시간 하루 활동 형태와 아주 유사한 모습을 나타내고 있다. 따라서 본 연구에서는 이점을 분석하여, 휴면기 및 활동기 등 2단계로 구분하고 변압기에서 발생하는 지상 전력을 콘덴서를 이용하여 개선하는 방안을 제시하였다.

2.1 휴면 시간대 보상 콘덴서

그림 2에서 시간별 지상전력 발생량의 곡선은 그림 1의 전류 사용량과 동일한 패턴을 제시하고 있다. 이는 전 시간대에 동일한 평균역률을 적용하였기 때문이다.

표 1. 50kVA 주상변압기의 일 시간별 사용 전력량과 콘덴서 1차 보상 후 데이터

Table 1. Using data of 50kVA P. Tr using data per hour and data after 1st compensating of condenser

시간	전압 V	전류 A	이용률 (%)	무효 전력 kvar	진상 전력 kvar	무효 전력 (개선후)	역률 (개선후)	전류 A (개선후)	전류감소량 (개선후) A
	A	A	A	A	A	A	A	A	A
0:00	226	104	47.0	6.16	2.61	3.56	0.998	101.59	2.41
1:00	226	68	30.7	4.03	2.61	1.42	0.995	65.92	2.08
2:00	225	45	20.3	2.66	2.58	0.07	1.000	43.43	1.57
3:00	226	44	19.9	2.61	2.61	0.00	1.000	42.46	1.54
4:00	227	49	22.2	2.92	2.63	0.29	0.999	47.30	1.70
5:00	227	51	23.2	3.04	2.63	0.41	1.000	49.25	1.75
6:00	227	49	22.2	2.92	2.63	0.29	0.998	47.30	1.70
7:00	225	55	24.8	3.25	2.58	0.66	0.998	53.16	1.84
8:00	227	49	22.2	2.92	2.63	0.29	1.000	47.30	1.70
9:00	228	58	26.4	3.25	2.65	0.81	0.998	56.08	1.92
10:00	227	71	32.2	4.23	2.63	1.60	0.995	68.87	2.13
11:00	227	74	33.6	4.41	2.63	1.77	0.994	71.84	2.16
12:00	227	84	38.1	5.00	2.63	2.37	0.992	81.73	2.27
13:00	227	82	37.2	4.88	2.63	2.25	0.992	79.75	2.25
14:00	226	94	42.5	5.57	2.61	2.96	0.990	91.65	2.35
15:00	227	91	41.3	5.42	2.63	2.79	0.990	88.67	2.33
16:00	227	108	49.0	6.43	2.63	3.80	0.987	105.55	2.45
17:00	227	90	40.9	5.36	2.63	2.73	0.991	87.68	2.32
18:00	227	90	40.9	5.36	2.63	2.73	0.991	87.68	2.32
19:00	226	95	42.9	5.63	2.63	3.02	0.990	92.65	2.35
20:00	226	99	44.7	5.87	2.63	3.26	0.989	96.62	2.38
21:00	227	97	44.0	5.77	2.63	3.14	0.989	94.62	2.38
22:00	228	98	44.7	5.86	2.63	3.21	0.989	95.61	2.39
23:00	226	107	48.4	6.34	2.63	3.73	0.987	104.57	2.43
합계	5439	1852	839.5	110.1	63.9	47.1		1801.3	50.73
평균	226.6	77.2	35.0	4.59	4.59	1.96	0.993	75.05	2.11

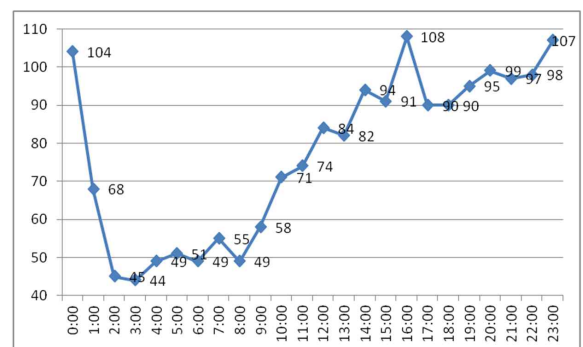


그림 1. 50kVA 주상변압기 시간별 전류 곡선
Fig. 1. Current curve of 50kVA P.Tr. per hour

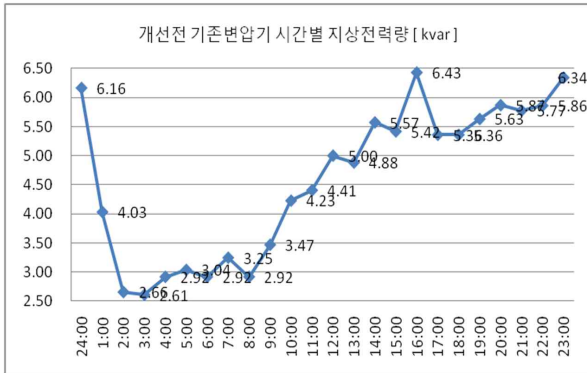


그림 2. 50kVA 주상변압기 시간별 지상전력 곡선
Fig. 2. Lagging power curve of 50kVA P. Tr.per hour

그림 2에서 휴면 시간대는 01:00시부터 09:00시로 판단하였다. 1단계 보상용 콘덴서 투입은 이 시간대 지상 전력의 최소값에서 결정하였다. 이 콘덴서를 휴면기 보상 콘덴서라 칭하였으며, 이때 최저 지상 전력의 크기는 표 1에서 03:00시의 2.61kvar이며, 입력 전류는 44A이다. 휴면기 보상 콘덴서는 24시간 작동한다. 지상전력 2.61kvar를 보상할 수 있는 콘덴서 용량 C_1 은 식 (2)를 이용하면 약 135.5 μF 이다.

2.2 활동 시간대 보상 콘덴서

그림 2에서 변압기의 활동시간 대는 앞에서 언급한 휴면시간 대를 제외한 10:00시 에서 24:00시 까지이며 시간 별로 15개소에 해당된다. 표 1에서 17:00의 무효전력이 5.36kvar 시점에 콘덴서를 병렬로 투입하면, 5.36kvar와 같거나 그보다 큰 11회를 보상할 수 있다. 나머지 13회는 03:00시의 2.61kvar 휴면기 콘덴서가 작동하여 무효전력을 보상할 수 있게 되어, 총 95.64kvar로 최대 무효전력을 보상할 수 있다. 따라서 활동시간대의 보상 평균전력은 5.36kvar로 선정할 경우에 보상용 콘덴서 C_2 의 크기는 식 (2)를 이용하면 약 275.9 μF 가 되나, 이때 이미 휴면기 콘덴서 C_1 이, 약 135.5 μF 로 기 동작하고 있으므로 실제적인 보상용 콘덴서 용량 C_2 는 약 140.4 μF 를 사용하였다.

2.3 휴면기 및 활동기의 보상 콘덴서 동작 전류 설정

① 휴면기 보상콘덴서 동작 전류

표 1에서 휴면기 보상 콘덴서, C_1 이 투입되는 동작 전류의 선정은 03:00시의 44A로 설정하였다. 그 이유는 바로 위의 전류인 45A로 설정 경우에 보상용 콘덴서를 off하는 시점이 늦어진다면 보상용 콘덴서에 의한 진상전력이 발생 될 수 있기 때문에 이를 차단하기 위해서 이다. 표 1에 제시된 것과 같이 03:00시의 44A에서 휴면기 콘덴서, C_1 이 on되면 주상변압기의 전류는 즉시 보상 후 전류 값인 42.46A로 변하게 되고, 이 시점부터 주상변압기는 24시간 동안 보상 후 전류 곡선으로 동작하게 된다. 그러므로 휴면기 시의 보상용 콘덴서, C_1 은 개선 전 전류곡선 44A에서 동작하되, 그 이후에는 휴면기 보상 후 전류곡선을 따라 동작하기 때문에 03:00시의 전류 42.46A에서도 동작을 유지하여 지상 전력을 보상하여야 한다. 그러나 휴면기 전류가 42.46A보다 작아질 경우에는 반드시 off되는 조건을 갖도록 설계되어야 전력전송에 불필요한 진상전력의 발생을 최소화할 수 있다.

② 활동기 보상콘덴서 동작전류

표 2에는 앞에서 언급한 17:00시의 5.36kvar를 보상할 수 있는 활동기 콘덴서를 동작 시켰을 경우에 도출된 주상변압기 데이터를 제시하였다.

표 2에서 휴면기 보상 콘덴서는 24회, 그리고 활동기 보상 콘덴서도 총 11회 무효전력을 보상하고 있다.

표 1에서 활동기 보상 콘덴서가 17:00시의 5.36kvar에서 투입된다면, 이때의 전류는 90A이나, 이미 휴면기 콘덴서가 작용하고 있기 때문에 그 보상된 전류인 87.68A에서 활동기 콘덴서가 실제적으로 작동되어야 한다. 그리고 활동기 콘덴서가 보상되면, 다시 주상변압기의 보상 후 전류는 표 2에서 17:00시의 86.85A가 되기 때문에 활동기 콘덴서는 주상변압기의 전류가 87.68A에서 on되고, 이를 86.85A까지 유지하다가 전류 값이 86.85A보다 작은 값이 될 때 off되어야 한다.

표 2에서 보상 콘덴서 사용 후 변압기의 역할은

0.965 에서 0.999로 개선되었으며, 이에 따른 전류 감소량은 시간당 평균 2.53A를 나타내고 있으나, 표 2에는 평균2.6A로 소수점 한자리까지 표시되었다. 이 계산식은 엑셀 함수로 처리하였다.

표 2. 휴면기 및 활동기 보상 후 변압기 시간 별 데이터

Table 2. Compensated data of P. Tr for waking and sleeping hours

시간	전압 V	전류 A	이용률 %	무효 전력 kvar	진상 전력 kvar	무효 전력 (개선후)	역률 (개선후)	전류 A (개선후)	전류감소량 (개선후) A
0:00	226	104	47.0	6.16	5.31	0.85	0.999	100.43	3.57
1:00	226	68	30.7	4.03	2.61	1.42	0.995	65.92	2.08
2:00	225	45	20.3	2.66	2.58	0.07	1.000	45.43	1.57
3:00	226	44	19.9	2.61	2.61	0.00	1.000	42.46	1.54
4:00	227	49	22.2	2.92	2.63	0.29	1.000	47.30	1.70
5:00	227	51	23.2	3.04	2.63	0.41	0.999	49.25	1.75
6:00	227	49	22.2	2.92	2.63	0.29	1.000	47.30	1.70
7:00	225	55	24.8	3.25	2.58	0.66	0.998	53.16	1.84
8:00	227	49	22.2	2.92	2.63	0.29	1.000	47.30	1.70
9:00	228	58	26.4	3.47	2.65	0.81	0.998	56.08	1.92
10:00	227	71	32.2	4.23	2.63	1.60	0.995	68.87	2.13
11:00	227	74	33.6	4.41	2.63	1.77	0.994	71.84	2.16
12:00	227	84	38.1	2.00	2.63	2.37	0.992	81.73	2.27
13:00	227	82	37.2	4.88	2.63	2.25	0.992	79.75	2.25
14:00	226	94	42.5	5.57	5.31	0.26	1.000	90.72	3.28
15:00	227	91	41.3	5.42	5.36	0.06	1.000	87.82	3.18
16:00	227	108	49.0	6.43	5.63	1.07	0.999	104.33	3.67
17:00	227	90	40.9	5.36	5.63	0.00	1.000	86.85	3.15
18:00	228	90	40.9	5.36	5.63	0.00	1.000	86.85	3.15
19:00	226	95	42.9	5.63	5.31	0.32	1.000	91.69	3.31
20:00	226	99	44.7	5.87	5.31	0.56	1.000	95.57	3.43
21:00	227	97	44.0	5.77	5.36	0.42	1.000	93.62	3.38
22:00	228	98	44.7	5.86	5.40	0.46	1.000	94.59	3.41
23:00	226	107	48.4	6.34	5.31	1.03	0.999	103.36	3.64
합 계	5439	1852	839	110.1	92.8	17.3		1,790.2	61.8
평균	226.6	77.2	35.0	4.6	3.9	0.72	0.999	74.6	2.6

3. 보상용 콘덴서 제어 회로 구성

3.1 회로의 구성 및 개요

표 2로 제시된 주상변압기의 지상 전력을 개선하기 위한 콘덴서 제어회로 구성 블록도는 그림 3과 같이 전원부, 센서부 및 제어부 그리고 SSR을 이용한 스위칭부로 구성하였다.

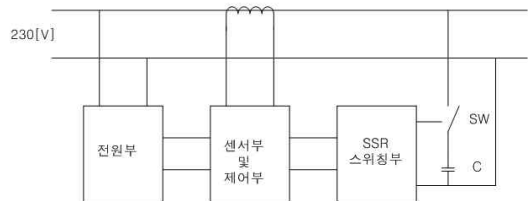


그림 3. 콘덴서 제어회로 전체 블록도
Fig. 3. Whole block diagram of condenser Control Circuit

3.2 전원부 회로도

그림 4는 콘덴서 제어회로에 전원을 공급하는 전원 회로도 이다. 이는 주상변압기 2차 측 전압 AC 230V를 변압기, 다이오드와 콘덴서를 이용하여 DC 전압을 만드는 회로이며 제너다이오드 Z_d 로 일정 전압을 공급하도록 구성된 일반적인 회로이다. 출력전압 V_{cc} 는 10V이며, 제어부 Op 앰프의 B 전원으로 공급된다.

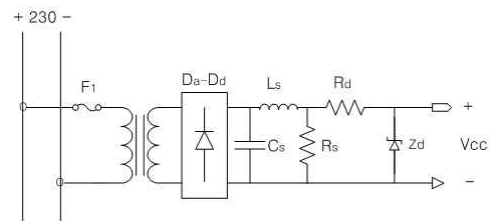


그림 4. 전원 회로도
Fig. 4. Voltage source circuit

3.3 센서 및 제어부 회로구성 및 개요

① 센서부 동작

그림 5는 센서부와 제어부의 회로도이다. 전류센서는 2000:1 변류기(CT)로 구성하였다. 센서 전류는 다

이오드 D_1 - D_4 , 콘덴서 C 를 거쳐 저항 R 에 제어전압을 형성한다. 저항 R 은 저항 R_a 와 R_b 로 구성하였다. 변류기에서 검출된 주상변압기의 전류는 식 (3)으로 저항 R 에 전압 V_R 을 형성하고 제너다이오드를 Z_a 를 거쳐 휴면기 Op 앰프의 비반전 단자에 인가된다. 식 (4)에 의한 저항 R_b 의 전압 V_{Rb} 는 제너다이오드를 Z_b 를 거쳐 활동기 Op 앰프의 비반전 단자에 인가된다. 이 때 저항 R 은 300옴 그리고 저항 R_b 는 155옴을 사용하였다.

$$V_R = \text{변압기전류} \times CT\text{변류비} \times R\text{저항값} \quad (3)$$

$$V_{Rb} = \text{변압기전류} \times CT\text{변류비} \times R_b\text{저항값} \quad (4)$$

단 V_R : 휴면기 시 변류기 저항 R 단자전압
 V_{Rb} : 활동기 시 변류기 저항 R_b 단자전압

표 3. 변류기 전류 및 전압
 Table 3. Current and voltage of CT.

구분	차례	주상변압기전류 A	CT전류 mA	R 옴	VR V	Za전압 V	C1	C2
휴 면 기	1	40.00	20.00	300	6.00	개방	Off	Off
	2	42.46	21.23	300	6.37	개방	0n	Off
	3	44.00	22.00	300	6.60	6.50	on	Off
	4	49.00	24.50	300	7.35	6.50	on	Off
구분	차례	주상변압기전류 A	CT전류 mA	Rb 옴	VRb V	Zb전압 V	C1	C2
활 동 기	1	84.00	42.00	155	6.51	개방	on	off
	2	86.85	43.42	155	6.73	6.70	on	on
	3	87.68	43.84	155	6.80	6.70	on	on
	4	92.65	46.33	155	7.18	6.70	on	on

표 3에는 주상변압기 시간 별 전류 중, 휴면기에 콘덴서를 보상하여야 하는 전류 44A와 콘덴서를 제거하여야 하는 전류 42.46A를, 그리고 활동기에 콘덴서를 보상하는 전류 87.68A와 콘덴서를 제거하여야 하는 전류 86.85A를 중심으로 변류기 전류, 저항전압 V_R 과 V_{Rb} 를 표시하였다. 표 3에서 휴면기 제너다이오드 전압 Z_a 는 주상변압기의 전류가 44A 이상에서는

6.50V로 동작되도록 고정하였다. 그리고 활동기의 제너 다이오드 Z_b 의 전압은 87.68A 이상에서는 6.70V로 동작되도록 고정하였다. 표 3에서 전압 V_R , V_{Rb} 는 소수점 3째 자리에서 반올림하였다.

② 제어부 회로 동작

그림 5에서 우측에 제시된 (a)휴면기 및 (b)활동기 제어부는 비반전 증폭기로 구성된 히스테리시스 회로이다[2]. 각각 Op 앰프의 비반전 단자에는 표 3에 표시된 Z_a 와 Z_b 의 전압이 인가된다. 그리고 Op 앰프의 반전단자는 그림 4의 V_{cc} 전압 10V가 저항 R_1 과 R_2 에 비례하여 Op 앰프의 기준 전압, V_{ref} 로 작용한다.

또한 Op 앰프의 비반전 단자에 연결된 각각의 저항 R_A 와 R_F 는 표 3에서 제시된 Z_a 와 Z_b 전압을 비교하여 Op 앰프의 출력이 High 또는 Low가 되기 위한 히스테리시스 전압을 결정하는데 기여한다. 여기서 VUT는 Op 앰프의 출력 V_{01} , V_{02} 가 Low 상태에서 High로 전환할 때의 전압이며, 반대로 V_{LT} 는 Op 앰프의 출력 V_{01} , V_{02} 가 High 상태에서 Low로 전환할 때의 전압이며 된다. 그 식은 식 (5)와 식 (6)으로 표시된다.

$$V_{UT} = V_{ref} \times (1 + R_A/R_F) - V_{oL} \times (R_A/R_F) \quad (5)$$

$$V_{LT} = V_{ref} \times (1 + R_A/R_F) - V_{oH} \times (R_A/R_F) \quad (6)$$

위 식에서 V_{oL} 은 Op 앰프의 출력, V_{01} 의 전압이 0V이고, V_{oH} 는 Op 앰프의 출력, V_{01} 의 전압이 10V인 경우이다.

표 4에는 표 3에 표시된 휴면기 시의 제너다이오드, Z_a 의 전압과 그리고 그림 5 (a) 휴면기 제어부에 사용된 각 소자 값을 표시하고 식 (5), 식 (6)을 이용하여 그 결과 값을 제시하였다.

표 4에서 센서부 제너다이오드 Z_a 전압이 Upper Threshold 전압인 VUT 6.50V로 유지되면 Op 앰프의 출력 V_{01} 은 계속 10V를 유지한다. 그리고 Z_a 의 전압이 Low Threshold 전압인 V_{LT} 의 6.35V 이하이면 Op 앰프의 출력 V_{01} 은 계속 0V가 된다. 여기서

V_{UT} 전압과 V_{LT} 전압은 소수점 3째 자리에서 반올림하였다.

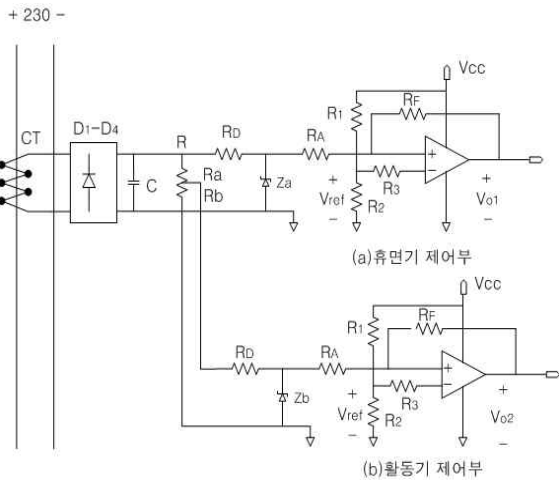


그림 5. 센서부와 콘덴서 제어 회로도
Fig. 5. CT and condenser control circuit

표 4. 휴면기 시 히스테리시스 동작전압과 Op 앰프 출력전압

Table 4. Hysteresis voltage and output voltage of Op amp. during sleeping hours

R	Za	Vcc	Vref	RA	RF	VUT	VLT	V01
300Ω	6.50V	10v	6.40v	15kΩ	1M	6.50V	6.35V	10v

표 4에서 표시된 Upper Threshold 전압 V_{UT} 를 식 (7)을 이용하여 주상변압기 전류 I_{UT} 로 환산하였으며, Low Threshold 전압 V_{LT} 는 식 (8)을 이용하여 주상변압기 전류 I_{LT} 값으로 환산하고 이를 그림 6에 히스테리시스 곡선으로 표시하였다. 식 (7)에서 사용된 0.1은 변류기와 제너다이오드 사이의 전압강하 보상 값이고, Low Threshold인 식 (8)에는 이를 적용하지 않았다.

$$I_{UT} = (V_{UT} + 0.1) / R \times CT \text{ 변류비} \quad (7)$$

$$= 44[A]$$

$$I_{LT} = V_{LT} / R \times CT \text{ 변류비} \quad (8)$$

$$= 42.33[A]$$

식 (7)에서 V_{UT} 가 환산된 I_{UT} 의 전류 44A는 휴면

기 시 보상용 콘덴서를 투입하는 03:00시의 주상변압기 전류 44A와 동일한 값이다. 또한 식 (8)에서 V_{LT} 가 환산된 I_{LT} 전류 42.33A는 콘덴서를 차단하기로 설정된 42.46A보다 약간 낮은 전류 값을 보여주고 있다.

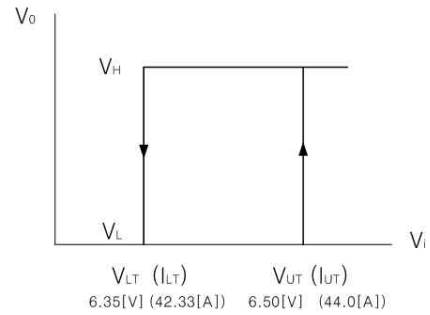


그림 6. 휴면기 시 히스테리시스 전압 및 전류 동작곡선
Fig. 6. Hysteresis voltage and current curve during sleeping hours

표 5에는 표 3의 제너다이오드, Z_b 의 전압과 그리고 그림 5 (b) 활동기 제어부에서 사용된 각 소자값을 표시하고 식 (5), 식 (6)을 이용하여 그 결과 값을 제시하였다. 표 5에서 Upper Threshold 전압 V_{UT} 는 소수점 3째 자리에서 반올림하면 6.67V이다. 이 값을 식 (7)에 의한 환산 전류, I_{UT} 는 87.35A로 활동기 시 콘덴서 투입결정 전류인 87.68A보다 약간 낮은 값이다. 또한 Low Threshold 전압 V_{LT} 는 6.57V이며, 이 값을 식 (8)에 의한 환산전류, I_{LT} 의 크기는 84.77A로 활동기시의 차단전류 86.85A의 0.976배에 해당된다. 실제 차단전류 값이 목표 차단전류 값보다 낮은 값에서 작동하여야 하는 이유를 설명하면, 표 1에서 17:00시의 주상변압기의 전류가 87.68A일 때 활동기 콘덴서가 2번째로 투입되고, 무효전력을 보상함에 따라 보상 후 전류는 표 2의 17:00시의 전류 86.85A로 감소된다. 그리고 콘덴서 off 시점이 실제로 86.85A와 일치된다면 콘덴서는 지속적으로 on/off 동작을 반복할 수 있기 때문에 이를 방지하기 위해서는 콘덴서의 off 시점을 86.85A보다 작은 값으로 설정하여야 한다. 계산된 값들은 소수점 셋째 자리에서 반올림하였다.

표 5. 활동기 시 히스테리시스 전압과 Op 앰프의 출력전압

Table 5. Hysteresis voltage and output voltage of Op amp. during waking hours

Rb	Zb	Vcc	Vref	RA	RF	VUT	VLT	VO2
155Ω	6.70V	10v	6.60v	10kΩ	1M	6.67V	6.57V	10v

그림 7에는 SSR을 이용한 콘덴서 스위칭 회로를 제시하였다.

SSR은 계전기와 동일한 기능으로 전자적으로 트라이악을 on/off시키므로 스위칭 역할을 한다. SSR은 그림 7에서와 같이 입력회로와 포토트랜스 그리고 제로크로싱 회로가 포함되어 트라이악을 on/off하기 위한 스위칭회로로 구성되어 있으며, 수십 암페어를 흘릴 수 있는 콘덴서 구동용인 상용 제품은 일반화되어 있다.

그림 5에서 Op 앰프의 출력인 Vo1 및 Vo2의 전압이 high가 되면 그림 7의 포토커플러가 동작하고, SSR의 트라이악이 도통되어 보상용 콘덴서가 주상변압기에 병렬로 연결되어 지상 전력을 보상한다. 그리고 Op 앰프의 출력이 low가 되면 콘덴서는 off가 된다.

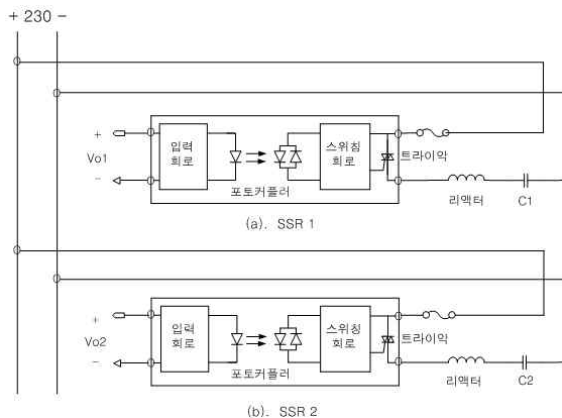


그림 7. SSR를 이용한 콘덴서 스위칭 회로도
Fig. 7. Condenser switching circuit using SSR

4. 역률 개선에 따른 경제적 효과

국내에서 사용되고 있는 주상변압기는 약 194만대이며, 용량이 50kVA인 주상변압기는 약 521,000대로

한국전력공사 내부자료(2010년 06월)를 이용하였다.

주상변압기 역률 개선을 위해 콘덴서 제어회로 구성에 들어가는 주요 부품을 중심으로 하여 소요되는 비용을 표 6에 표시하였다. 그 비용은 대략 174,000원이 소요되는 것으로 예측되었다. 물론 주상변압기에 장착하는 비용, 그리고 제품의 유지비용 까지 감안한다면 다소 비용이 소요 가격보다는 올라가리라 예상된다. 그리고 장비의 내구 년한은 최소 5년으로 하였다.

표 6에는 콘덴서 제어회로 구성에 들어가는 부품의 재료값을 표시하였다.

표 6. 콘덴서 제어회로 구성비용

Table 6. Construct cost of condenser control circuit

품명	규격	단가(원)	수량(개)	금액(원)
SSR	60A	50,000	2	100,000
콘덴서	3kvar	20,000	2	40,000
C T	2,000:1	4,000	1	4,000
기타		30,000	1식	30,000
합계				174,000

표 2에서 주상변압기 A상의 역률이 0.965에서 0.999로 향상되었을 경우, 전류 감소량은 시간당 평균 2.6A 이었다. 이러한 결과를 표 2에 표시된 평균전압과 시간별 평균 감소전류량을 기준하여 경제적 효과로 계산하면,

$$\begin{aligned}
 \text{경제효과} &= \text{평균전압} \times \text{평균감소전류} \times 24\text{시간} \\
 &\quad \times 365\text{일} \times kW\text{당 전력 구입단가} \\
 &= 227[V] \times 2.6[A] \times 24 \\
 &\quad \times 365 \times 78.51\text{원}/1000 \\
 &= 407,062\text{원}
 \end{aligned}$$

이다. 여기서 평균전력 구입단가인 1kW당 78.51원은 한전 전력통계속보 2011년 4월 309호 자료를 인용하였다.

따라서 간략한 비교를 위해 콘덴서 제어회로 설치 및 유지비용이 경제효과 1년차 비용인 407,062원에 접

근한다고 가정하여도, 2년차부터는 최소 4년간 약 1,600,000원 이상 경제적 효과가 있다. 이를 단상의 경우로 50kVA 주상변압기 521,000대에 확대한다면, 연간 약 2000억 원의 경제효과를 예측할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 주상 변압기의 평균 역률을 바탕으로 측정된 데이터를 기반으로 변압기의 일 전류곡선을 휴면기와 활동기 상태로 구분하고, 휴면기 시에는 최소 전류 사용 시점에서 휴면기 보상 콘덴서를 투입하고, 활동기 시에는 활동기의 평균 전류 값 부근에서, 최대 무효전력 보상이 가능한 시간대를 선정하여 활동기 콘덴서를 투입하는 방안을 채택하였다. 그리고 콘덴서 on/off 제어는 변류기와 Op 앰프를 이용한 히스테리시스 회로를 이용하여 제어하였다. 연구에서 시뮬레이션한 결과는 주상변압기의 역률은 0.965에서 0.999로 개선되었고, 사용전류 감소는 일평균 시간당 2.6A로 도출되었다. 동일한 방법으로 일 전류곡선이 각각 다른 6대 주상 변압기의 각상에 대한 18개 역률도 평균 0.99 이상으로 개선되었다. 그러나 실제 필드 적용 시에는 소수점 이하로 주어지는 히스테리시스의 동작 전압을 보다 명료하게 설정할 필요가 있다.

본 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] L.F Blume, A.Boyajiam, G.Camilli,T.C.Lenox, S.Minneci, V.H.Montsinger, Transformer Engineering, 2nd Edition, Seongahangdang,1977.
- [2] Johnson, Hilburn,Scott, Basic Electric Circuit Analysis, 5th Edition,SciTech, 2007.
- [3] Sae-dong Kim, Saving technologies of electric power consumption by reasonably the power factor management, Journal of electrical world, no.278, 2000, pp.31-44.
- [4] Sik Moon, Bong-sung Kim, Jae-nam Ryu, Study on power factor of standby power, Journal of Korean Institute of Electrical Engineers, 2010 Pages 784-785.

◇ 저자소개 ◇



이광직(李洸植)

1949년 2월 11일생. 1992년 2월 동국대학교 대학원 전기전자공학 박사학위 취득. 현재 서울과학기술대학교 전자IT 미디어공학과 교수.