

## 전압 불평형시 콘덴서 전압, 전류, 용량 특성 해석

(Characteristics Analysis for Voltage, Current & Capacity  
of Condenser at Voltage Unbalance)

김종겸\* · 박영진

(Jong-Gyeum Kim · Young-Jeen Park)

### 요 약

전압 불평형은 수용가 설비에서 상당히 중요한 전기 품질의 하나로 간주되고 있다. 전압은 송전선로 계통에서는 평형에 가깝지만, 수용가에서의 전압 레벨은 시스템 임피던스의 불평형과 단상 부하의 고르지 못한 배분 등으로 인해 불평형이 될 수 있다.

콘덴서는 역률 보상으로도 사용되며, 비선형 부하에서 발생하는 고조파를 저감하기 위해 리액터와 함께 사용되고 있다. 전압 불평형이 존재할 경우 전류 불평형으로 콘덴서에서는 용량변화가 일어난다. 콘덴서와 리액터를 함께 사용하는 경우 사고 발생이 높은 편이다. 그래서 콘덴서 설비에 전압 불평형이 존재할 경우 전압, 전류 그리고 용량의 변화가 어떻게 진행되는지 확인하는 것이 매우 중요하다.

본 연구에서는 전압 불평형률이 존재할 경우 콘덴서 단독운전과 리액터의 부착시 전압, 전류 및 용량의 크기가 규정에서 제시한 범위 이내인지를 계산하였다.

### Abstract

Voltage unbalance is regarded as a power quality problem of significant at the user application. Although the voltages are quite well balanced at the transmission system, the voltage level of utilization can be unbalanced due to the unequal system impedances and the unequal distribution of single phase loads.

Capacitor is generally used for power-factor compensation and reducing harmonics of non linear load with reactor. If voltage unbalance exists, current unbalance is generated and it will be reflected in the capacity variance. When the reactor and condenser are used at the same location, generally its trouble rate is high. And it is very important checking out that how the variance of voltage, current and capacity of condenser is proceeded by the voltage unbalance.

In this paper, we calculated that voltage, current and capacity of condenser are within the tolerance limit of official regulations in the event of voltage unbalance with/without reactor.

Key Words : Capacitor, Reactor, Voltage Unbalance, Power Quality

\* 주저자 : 강릉원주대학교 전기공학과 교수 · 공박

Tel : 033-760-8785, Fax : 033-760-8780, E-mail : jgkim@gwnu.ac.kr

접수일자 : 2010년 2월 10일, 1차심사 : 2010년 2월 16일, 심사완료 : 2010년 3월 4일

## 1. 서 론

전력용 콘덴서는 무효전력의 제공, 전압 안정화, 역률 개선 그리고 시스템 전력 손실의 감소에 따른 시스템 용량 증가를 가능하게 하므로 수용가에서 많이 사용하고 있다. 전력용 콘덴서는 주로 온도, 전류, 전압 등의 영향으로 정상적인 수명이 보장되지 않아 절연 파괴 등으로 소손되는 경우가 많다[1-3].

콘덴서의 수명에 큰 영향을 주는 요소로서 온도 상승 외에 과부하, 전압변동, 고조파 등에 의한 전기품질의 저하로 사고가 자주 발생하고 있다. 그래서 각 나라별 또는 기관별로 콘덴서의 안정적인 사용을 보장하기 위해 전압, 전류, 용량 등에 따른 제 규격을 정하고 있다[3].

최근 수용가 부하에는 선형부하 외에 전력변환과정에서 발생하는 고조파를 포함하는 비선형 부하가 많이 사용되고 있다. 그래서 단순한 역률 보상용으로 콘덴서만 설치하는 경우보다는 고조파를 흡수하면서 역률 보상이 가능하도록 콘덴서와 리액터를 함께 사용하는 경우가 많다. 고조파는 부하의 운전동안 지속적으로 존재하므로 이 고조파를 저감하기 위해 콘덴서와 직렬로 연결하여 사용한다. 콘덴서에 리액터를 추가하는 것은 전압을 상승시켜 전류와 용량을 증가시킬 수 있다.

본 연구에서는 전기품질 중에서 전압 불평형이 존재할 경우 콘덴서에서 리액터를 부착 여부에 따른 전압, 전류 및 용량의 변화를 분석하여 규정에서 정하고 있는 허용범위와 전압 불평형률과의 관계를 분석하였다.

## 2. 전압 불평형

3상 회로에서 전압 불평형은 단상부하의 불평형 배분과 운전 그리고 불평형된 3상 부하의 연결로 발생하기도 하고, 평형 3상 부하에서도 불평형 전압에 연결되면 흐르는 전류는 불평형이 되어 각 상에 서로 다른 크기의 전압이 콘덴서 단자에 나타난다[2].

전압 불평형율(VUF : Voltage Unbalance Factor)은 식 (1)과 같이 정상분( $V_1$ )에 대해 역상분( $V_2$ )의 비율로서 정의한다.

$$VUF_1 = \frac{V_2}{V_1} \quad (1)$$

식 (1)에서 정상분  $V_1$ 과 역상분  $V_2$ 은 3상 불평형 선간전압  $V_{ab}$ ,  $V_{bc}$ ,  $V_{ca}$ 를 식 (2)와 같은 대칭성분으로서 불평형 조건하에서 부하의 특성 동작을 해석할 때 편리하다.

$$\begin{aligned} V_1 &= \frac{V_{ab} + a \cdot V_{bc} + a^2 V_{ca}}{3} \\ V_2 &= \frac{V_{ab} + a^2 \cdot V_{bc} + a V_{ca}}{3} \\ V_0 &= \frac{V_{ab} + V_{bc} + V_{ca}}{3} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서  $a = 1 \angle 120^\circ$ ,  $a^2 = 1 \angle 240^\circ$ 이다.

3상 선간전압만 측정하여 식 (3)을 이용하면 전압 불평형률은 식 (2)보다 쉽게 구할 수 있다.

$$VUF_2 = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \quad (3)$$

식 (3)에서  $\beta$  식 (4)로 구한 것이다.

$$\beta = \frac{|V_{ab}|^4 + |V_{bc}|^4 + |V_{ca}|^4}{(|V_{ab}|^2 + |V_{bc}|^2 + |V_{ca}|^2)^2} \quad (4)$$

## 3. 전압 불평형시 콘덴서 특성

콘덴서에서 전압은 3상이 모두 정확하게 일치하지 않는 경우가 많다. 각 상 또는 선간전압이 정격전압보다 높거나 낮은 경우에 전압 불평형이 발생한다. 전압 불평형은 결상과 같은 특별한 경우를 제외하고는 대개 3%이하에서 분포하는 경우가 많다.

각 상전압이나 선간전압이 정격전압보다 낮은 전압 불평형은 콘덴서에 영향을 주지 않으므로 정격전압보다 높은 전압이 단자에 나타날 경우에 대한 영향 분석이 필요하다.

콘덴서에 미치는 영향으로부터 안전한 사용을 위해 실효치 전압, 전류 및 피크 전압과 용량에 대하여

IEEE에서는 그 허용범위를 표 1과 같이 규정하고 있다[5].

표 1. 콘덴서의 허용 전압, 전류 및 용량  
Table 1. Permissible voltage, current & capacity of condenser

구분	배수	동작시간
전압	110[%]	24시간 중 12시간 이내
	110[%]	24시간 중 30분 이내
	120[%]	5분 이내
	130[%]	1분 이내
용량	135[%]	정격 무효전력
전류	135[%]	실효치

그림 1은 해석하고자 하는 회로에 대한 결선도와 회로도를 나타낸 것이다. 본 해석에는 전자계 과도해석 프로그램을 이용하였다[4]. 전압의 크기에 변화를 주기 위해서 그림 1 (b)에서 상전압( $V_{an}$ ,  $V_{bn}$ ,  $V_{cn}$ )의 크기를 조정할 경우 전압 불평형에 대한 콘덴서에서의 영향을 분석할 수 있다.

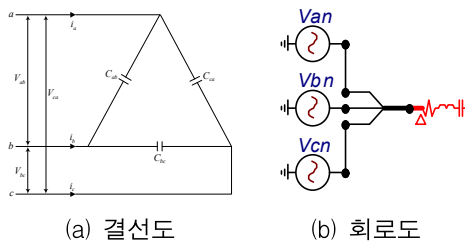


그림 1. 해석용 결선도 및 회로도  
Fig. 1. Connection diagram and circuit for analysis

해석에 사용된 콘덴서는 3상 380[V], 30[ $\mu$ F]의 정격을 갖는다. 콘덴서의 정격용량  $Q$  및 선간전류  $i_L$ 는 다음과 같이 구하면 된다.

$$Q = 2\pi f C V_L^2 = 377 \times 30 \times 10^{-6} \times 380^2 = 1,633 [VA] \quad (4)$$

$$i_L = \frac{Q}{\sqrt{3} \times V_p} = \frac{1,633}{\sqrt{3} \times 220} = 4.28 [A] \quad (5)$$

그림 1에서 한 상에 해당되는 용량은 식 (4)에서 구한 값의 1/3에 해당되는 값이다.

콘덴서에 인가되는 선간전압이  $V_L=380[V]$ 인 조건 하에서 콘덴서 한 상의 전류( $i_p$ )는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$i_p = \frac{V_L}{\sqrt{3}} \frac{1}{X_c} = \frac{380}{\sqrt{3}} \times \frac{1}{88.419} = 2.48 [A] \quad (6)$$

이와 같은 전압 및 전류에서 구한 콘덴서 한 상의 용량은 다음과 같이 구하면 된다.

$$Q_1 = \frac{V_L}{\sqrt{3}} \times i_p = \frac{380}{\sqrt{3}} \times 2.48 = 544 [VA] \quad (7)$$

위의 식 (7)에서 구한 계산 값은 식 (4)에서 구한 값의 1/3에 해당되는 것이지만 전압 불평형이 존재할 경우 그 편차는 점차 높아진다. 나머지 두 상에 대해서도 같은 방법으로 구하면 각상의 전압과 전류 그리고 용량을 얻을 수 있다.

표 2는 선간전압의 크기에 따라 콘덴서의 특성변화를 계산하기 위해 식 (3)으로 구한 전압불평형률의 계산 결과이다. 본 연구에서는 이를 사용하여 콘덴서에 리액터를 추가한 경우와 그렇지 않은 경우 전압, 전류 및 용량의 크기를 계산하였다.

표 2. 전압 불평형률의 비교  
Table 2. Comparison of VUF

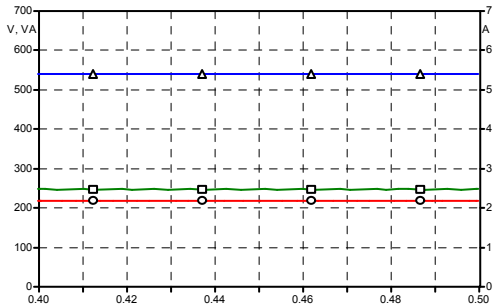
$V_{ab}$	$V_{bc}$	$V_{ca}$	VUF[%]
380.00	380.00	380.00	0
380.00	383.34	386.64	1
380.00	386.40	393.38	2
380.00	390.08	400.26	3

### 3.1 콘덴서에 리액터 미 부착시

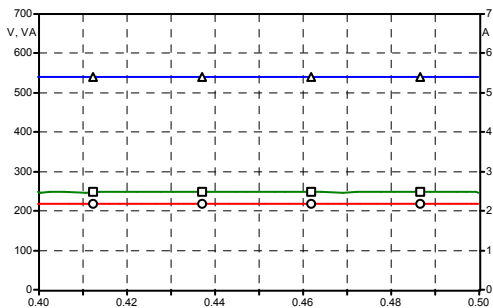
그림 2는 전압이 평형인 경우 콘덴서에 리액터를 부착하지 않은 상태에서 각 상의 전압, 전류 및 용량을 나타낸 것이다. 그림 2에서 x축의 일정시간에 대해 원

전압 불평형시 콘덴서 전압, 전류, 용량 특성 해석

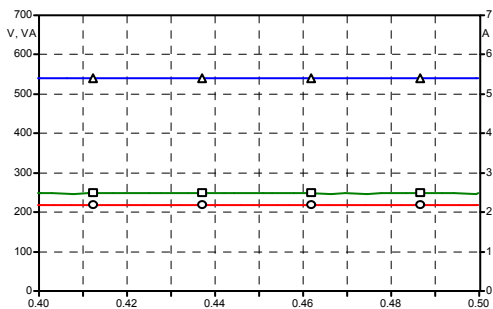
좌측 y축은 상별 전압 및 용량을 그리고 오른쪽 y축은 전류를 나타낸 것이다.



(a) A상 전압(○), 전류(□), 용량(△)



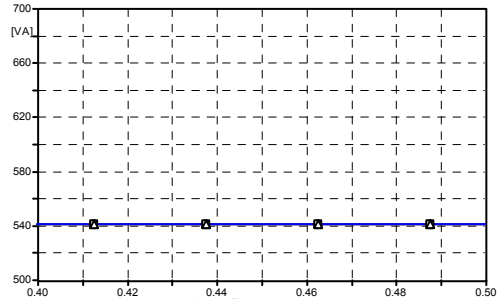
(b) B상 전압(○), 전류(□), 용량(△)



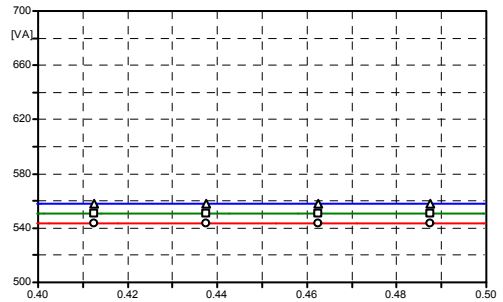
(c) C상 전압(○), 전류(□), 용량(△)

그림 2. 평형시의 전압, 전류 및 용량  
Fig. 2. Voltage, current and capacity at balance condition

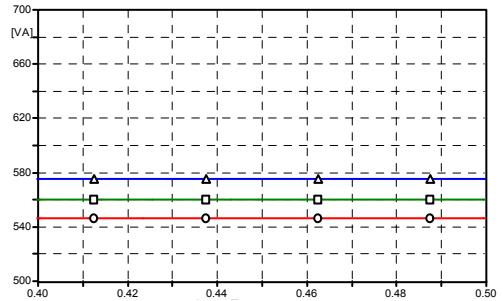
그림 2에서 알 수 있듯이 전압이 평형일 경우 각상의 전압, 전류 및 용량의 크기는 식 (4)~(7)에서 구한 결과와 일치한다. 그러나 각 상의 전압에 차이가 존재할 경우 전압은 물론이고 전류와 콘덴서의 용량에 차이가 나타난다.



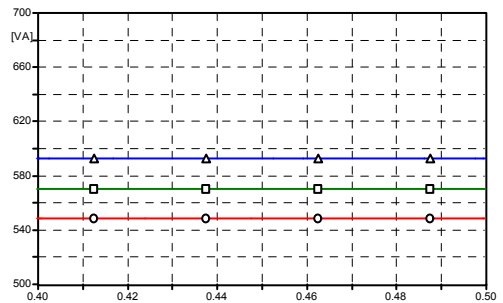
(a) 평형시



(b) 1[%] 불평형시



(c) 2[%] 불평형시



(d) 3[%] 불평형시

그림 3. 전압불평형률에 따른 콘덴서 용량 (리액터 미 부착시)  
Fig. 3. Condenser capacity by VUF (Without reactor)

그림 3은 표 2에서 제시한 전압 불평형률에 따라 콘덴서의 상별(A상 : ○, B상 : □, C상 : △)용량변화를 리액터를 부착하지 않은 상태에서 분석한 것이다.

그림 3 (a)에서와 같이 3상 전압이 일정한 경우 콘덴서의 상별용량은 동일한 값을 가지지만, 그림 3 (b)~(d)에서와 같이 전압불평형률이 증가함에 따라 콘덴서 각 상에서의 전압 크기와 전류가 서로 달라 상별 콘덴서의 용량에도 그 차이가 점차 벌어지며, 또한 각 상에서의 전류는 정격치보다 높아 콘덴서에서의 용량은 규격에서 명시한 것보다 약간 높아진 것을 알 수 있다.

표 3은 그림 2와 그림 3에서와 같이 콘덴서에 리액터를 부착하지 않은 상태에서 전압 불평형률에 따른 전압, 전류 및 콘덴서 용량의 크기를 나타낸 것이다.

표 3. 전압 불평형시 전압, 전류, 용량(리액터미부착시)  
Table 3. Voltage, current & capacity at VUF  
(Without reactor)

구 분	A상	B상	C상	sum	
0 [%]	전압[V]	217.38	218.96	218.70	
	전류[A]	2.49	2.47	2.47	
	용량[VA]	541.34	541.36	541.37	1,624
1 [%]	전압[V]	217.4	220.62	222.89	
	전류[A]	2.5	2.49	2.50	
	용량[VA]	543.72	550.90	558.03	1,652
2 [%]	전압[V]	217.4	222.75	226.4	
	전류[A]	2.51	2.51	2.54	
	용량[VA]	546.04	559.87	575.14	1,681
3 [%]	전압[V]	217.4	224.5	230.74	
	전류[A]	2.52	2.54	2.57	
	용량[VA]	548.55	570.48	593.01	1,712

콘덴서에 인가되는 전압의 불평형률에 따라 전압 및 전류 크기 그리고 용량에 대한 계산결과 전압 불평형률이 증가함에 따라 전압, 전류 그리고 용량의 값이 조금씩 증가하지만, 모두다 표 1에서 제시한 값의 허용 범위 이내임을 확인할 수 있다.

### 3.2 콘덴서에 리액터 부착시

최근 비선형 부하의 사용 등으로 인해 부하측에 단독으로 콘덴서를 사용하는 경우보다는 콘덴서에 리액터(p[%])를 직렬로 연결하여 사용하는 경우가 많다. 이는 고조파의 흡수와 역률 보상을 위한 것이다. 비선형 부하에서 발생하는 고조파 중에서 5고조파의 크기가 높기 때문에 이 고조파를 저감하는 동시에 역률 보상이 가능하도록 할 때 콘덴서에 리액터를 설치할 경우 식 (8)과 같이 콘덴서 전압( $V_c$ )이 상승한다.

$$V_c = \frac{V}{1 - \frac{p(\%)}{100}} [V] \tag{8}$$

콘덴서에 리액터를 설치할 경우 리액턴스는 다음과 같이 구하면 된다.

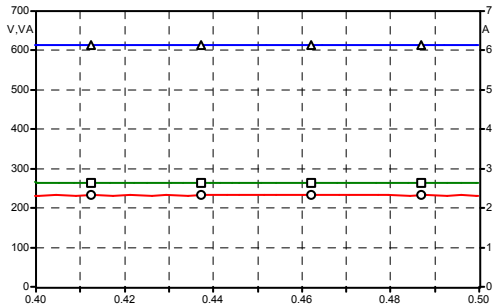
$$X_L = \%p \times X_c \tag{9}$$

5고조파 저감을 위해 콘덴서와 리액터를 조정할 경우 공진으로 전압 및 전류가 확대될 수 있으므로 유도성으로 하기 위해 5차에 해당되는 4[%] 대신 여유를 두어 리액터를 6[%]로 사용하고 있다. 이때 식 (8)에 6[%]에 해당되는 리액터를 사용할 경우 콘덴서에서의 220[V]의 상전압은 식 (8)로 계산할 경우 234[V]로 높아진다.

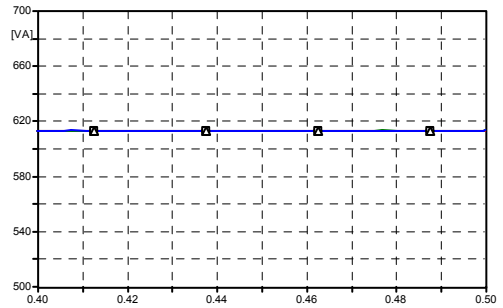
그림 4는 그림 1과 같은 380[V] 30[μF] 콘덴서에 직렬로 6[%]에 해당되는 리액터를 연결한 상태에서 전압 불평형이 존재한다고 가정하여 전압, 전류 및 콘덴서 용량의 변화를 나타낸 것이다.

그림 4에서 각 상의 인가전압이 일정할 경우 상별 전압, 전류 및 용량의 일정하다. 그림 4에서 왼쪽 y축은 전압[V] 및 용량[VA]을 나타낸 것이고, 오른쪽 y축은 전류[A]를 나타내고 있다. 그림 4에서와 같이 콘덴서에 리액터를 부착할 경우 부착하지 않은 그림 2의 경우에 비해 각 상의 전압, 전류 그리고 용량은 조금 높아진 것을 알 수 있다.

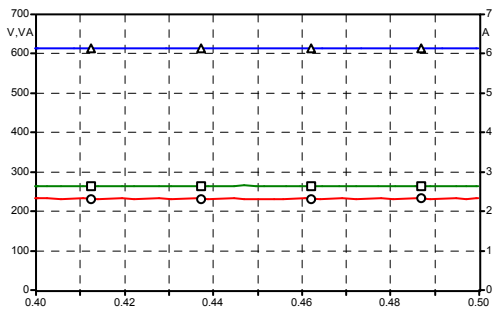
전압 불평형시 콘덴서 전압, 전류, 용량 특성 해석



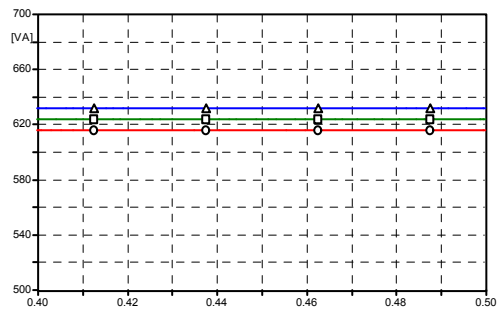
(a) A상 전압(○), 전류(□), 용량(△)



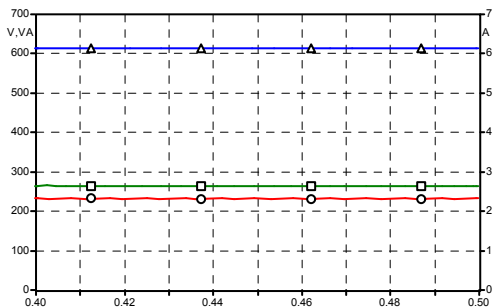
(a) 평형시



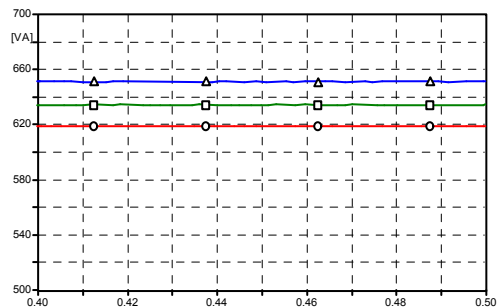
(b) B상 전압(○), 전류(□), 용량(△)



(b) 1[%] 불평형시



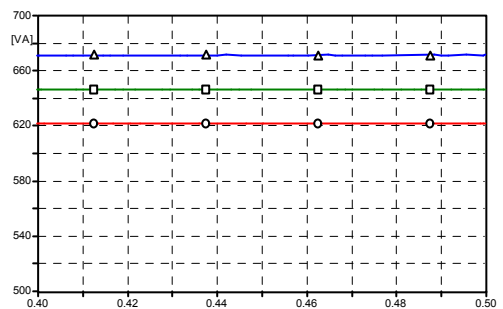
(c) C상 전압(○), 전류(□), 용량(△)



(c) 2[%] 불평형시

그림 4. 평형시 전압, 전류 및 용량(리액터 부착)  
Fig. 4. Voltage, current and capacity at balance condition (With reactor)

그림 5는 콘덴서에 리액터를 부착하고서 전압 불평형률의 증가에 따라 각 상별 용량을 나타낸 것이다. 그림 5 (a)와 같이 평형인 경우 각 상의 용량은 같지만, 리액터를 부착하지 않은 그림 3 (a)에 비해 용량이 약간 증가한 것을 알 수 있다. 그림 5 (b)~(d)에서와 같이 전압 불평형률이 증가함에 따라 상별 용량에는 그 차이가 점차 벌어짐을 알 수 있다.



(d) 3[%] 불평형시

그림 5. 전압 불평형률에 따른 콘덴서 용량(리액터 부착시)  
Fig. 5. Condenser capacity by VUF (With reactor)

표 4는 표 3에서와 같은 전압 불평형 운전 상태에서 콘덴서에 6[%] 리액터를 추가한 경우 전압, 전류 그리고 용량의 변화를 나타낸 것이다.

표 4. 전압 불평형시 전압, 전류, 용량(리액터부착)  
Table 4. Voltage, current & capacity at VUF  
(W/reactor)

구 분		A상	B상	C상	sum
0 [%]	전압[V]	233.4	233.4	233.4	
	전류[A]	2.63	2.63	2.63	
	용량[VA]	613	613	613	1,839
1 [%]	전압[V]	231.45	234.82	237.16	
	전류[A]	2.66	2.65	2.67	
	용량[VA]	616.1	624.21	632.15	1,872
2 [%]	전압[V]	231.47	236.96	240.97	
	전류[A]	2.67	2.67	2.70	
	용량[VA]	618.83	634.08	651.02	1,904
3 [%]	전압[V]	231.57	239.34	244.99	
	전류[A]	2.68	2.70	2.74	
	용량[VA]	621.86	646.09	671.07	1,939

표 4에서와 같이 2[%]의 전압 불평형률에서도 콘덴서의 피크 전압이나 실효치 전압 그리고 전류 및 용량은 허용범위 안에 존재하지만, 3[%] 전압 불평형시 C상에서는 111.7[%]에 해당되는 전압이 나타나고 있다. 전류는 모두 허용범위 안에 들고 용량도 같은 조건임을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 콘덴서에 인가되는 전압에 불평형이 존재할 경우 전압, 전류 및 용량의 변화를 해석하였다. 해석결과 콘덴서에 리액터를 부착하지 않은 경우는 전압 불평형률 3[%]에서도 허용기준 이내에 존재함을 알 수 있지만, 역률 보상 또는 고조파를 저감하기 위해 6[%]에 해당되는 리액터를 콘덴서에 부착한 상태에서 전압 불평형률이 3[%]를 초과할 경우 콘덴서의 전압이 허용범위를 초과함을 확인할 수 있었다.

#### 감사의 글

본 연구는 전력산업 연구개발 사업으로 수행한 것의 일부입니다.(과제번호 : R-2008-3-186)

#### References

- [1] Ramasamy Natarajan, "Power System Capacitors", Taylor & Francis, 2005.
- [2] 김종겸외 2인, "불평형 전압 동작시 전력 콘덴서 특성 분석", 조명전기설비학회 논문지, Vol.22, No.5, pp.64-72, 2008. 05.
- [3] Thomas M. Blooming, "Capacitor Application Issues", IEEE Trans on IAS, Jul-Aug, pp.1013-1026, 2008.
- [4] H.W. Dommel, "Electromagnetic Transients Program. Reference Manual (EMTP Theory Book)", BPA 1986.
- [5] IEEE Std 18-2002, "IEEE Std For Shunt Power Capacitors".

#### ◇ 저자소개 ◇



##### 김종겸 (金宗謙)

1961년 10월 3일생. 1996년 충남대 공대 전기공학과 졸업(박사). 1987~1988년 KT 근무. 1988~1996년 K-Water 근무. 1996년~현재 국립 강릉원주대학교 전기공학과 교수. 대한전기학회 평의원, 전기기기 및 에너지변환시스템부문 총무이사. 본 학회 이사.

Tel : (033)760-8785

E-mail : jgkim@gwnu.ac.kr



##### 박영진 (朴永鎭)

1959년 11월 19일생. 1982년 단국대학교 전기공학과 졸업. 1996년 단국대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1996년~현재 강릉원주대학교 전기공학과 교수.

Tel : (033)760-8784

E-mail: popspark@gwnu.ac.kr