

전압 불평형에서 콘덴서와 리액터의 직렬 연결시의 콘덴서의 특성 분석

논문
59P-3-14

A Study on Condenser Characteristics at the Series Connection of Condenser and Reactor Under Voltage Unbalance

김 일 중[†] · 김 중 겹^{*} · 박 영 진^{**} · 김 성 현^{***}
(Il-Jung Kim · Jong-Gyeum Kim · Young-Jeen Park · Sung-Hun-Kim)

Abstract - Capacitor has been used principally for the power factor compensation long ago. However now it does as passive filter to reduce harmonics of nonlinear load with reactor. Most of the customer's low-voltage feeder has been designed with approximately balanced and connected at the 3 phase four wire system. But voltage and current unbalance is appeared by the mixing operation of single or three phase load etc. The addition of reactor at the condenser may rise its terminal voltage. Voltage and current values above rating can act on electrical stress on the condenser.

In this paper, we calculated and measured that voltage, current and capacity of condenser are changed under the voltage balance. We conclude that magnitude and deviation of phase voltage act on major point of electrical stress.

Key Words : Voltage Unbalance, Condenser, Reactor, Voltage Rise, Stress

1. 서 론

콘덴서는 전동기와 같은 유도성 부하에 필요한 여자전원을 전원측을 대신하여 공급하기 위해 주로 사용한다. 또한 리액터와 결합하여 비선형 부하에서 발생하는 고조파 전류를 저감하는데 필요한 수동형 필터로서도 널리 사용되고 있다[1~5].

콘덴서는 유도성 부하에 필요한 무효전력을 공급하기 위해 개별 부하에 설치하는 경우도 있으며, 변압기 2차측에 설치하여 전원에서 필요한 역률을 일괄 보상하기 위해 독립적으로 설치하는 경우도 있다.

저압 수용가의 경우 배전시스템에서 3상 부하만 사용하는 경우 외에 단상 부하를 혼용하여 사용하는 경우가 많다. 이럴 경우 PCC(Point of Common Coupling)에서는 전압 불평형이 발생한다. 전원측에서도 전압 불평형이 발생하지만, 일반적으로는 수용가 부하의 영향으로 전압 불평형이 많이 발생한다.

최근 수용가에서는 비선형 부하의 사용 증가로 인해 PCC에서 전압 및 전류 고조파 성분이 높아져 역률 보상을 위해 콘덴서만 사용하는 경우보다는 고조파 성분도 저감하기 위해 콘덴서에 리액터를 추가하는 경우가 있다. 이와 같이 콘덴서에 리액터를 추가할 경우 전압 불평형으로 인해 콘덴서

가 어떤 변화가 있는지 확인할 필요가 있다. 그래서 본 연구에서는 콘덴서와 리액터를 연결하고서 전압 평형과 불평형시에 콘덴서의 특성변화를 측정을 통해 분석하였다.

2. 전압 불평형 및 전압 상승

2.1 전압 불평형

전압 불평형은 단상부하의 불평형 배분과 운전 또는 불평형된 3상 부하의 임피던스 연결로 발생하기도 하고, 평형 3상 부하에서도 불평형 전원에 연결되면 흐르는 전류는 불평형이 되어 각 상에 서로 다른 전압의 크기가 부하에 나타나기도 한다[2]. 전압 불평형률(VUF)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 선간 전압 V_{ab} , V_{bc} , V_{ca} 를 측정하여 식 (2)에 대입하면 전압 불평형률은 식 (1)과 같이 쉽게 구할 수 있다.

$$VUF_2 = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \quad (2)$$

식 (2)에서 β (3)으로 구한 것이다.

$$\beta = \frac{|V_{ab}|^4 + |V_{bc}|^4 + |V_{ca}|^4}{(|V_{ab}|^2 + |V_{bc}|^2 + |V_{ca}|^2)^2} \quad (3)$$

2.2 전압 상승

변압기 2차측에서 역률 보상과 고조파 저감을 위해 비선형 부

[†] 교신저자, 종신회원 : 호서대학교 기계공학과 교수 · 공박

E-mail : ijkim@hoseo.edu

^{*} 시니어회원 : 강릉원주대학교 전기공학과 교수 · 공박

^{**} 종신회원 : 강릉원주대학교 전기공학과 교수 · 공박

^{***} 정 회 원 : 공주대학교 제어계측공학과 교수 · 공박

접수일자 : 2010년 5월 24일

최종완료 : 2010년 7월 7일

<본 논문은 본 학회 2010년도 전기설비전문위원회 춘계학술대회에서 우수논문으로 선정되어 편집위원회에서 심사 후 본 논문지에 게재 되었음>

하의 앞단에 설치하는 필터는 콘덴서에 리액터를 연결하고 있다. 콘덴서에서 전압은 3상이 모두 정확하게 일치하지 않는 경우가 대부분이다. 각 상 또는 선간전압이 정격전압보다 높은 경우 또는 낮은 경우에 전압 불평형이 발생한다. 콘덴서에 리액터를 추가할 경우 전압이 상승한다. 이때 상승하는 콘덴서 전압(V_c)는 식 (4)와 같다.

$$V_c = \frac{V_p}{1 - \frac{p}{100}} [V] \quad (4)$$

식 (4)에서 p 는 특정 차수의 고조파를 저감하기 위한 파라미터로서 유도성 리액턴스에 대한 용량성 리액턴스의 비율로서 식 (5)로 구한 것이다.

$$p = \frac{X_L}{X_c} \quad (5)$$

본 연구에서는 콘덴서와 리액터를 detuned 필터로 사용되는 경우에 대한 것을 이용하였다. 측정 및 분석에 사용된 콘덴서는 80[μ F]이고, 리액터는 4.25[mH]이기 때문에 공진주파수(f_r)는 272.9[Hz]이다. 이 값을 식 (5)에 대입할 경우 p 는 4.83[%]가 된다. 이 값을 식 (2)에 대입할 경우 상전압은 231.17[V]가 된다.

3. 측정 및 결과 분석

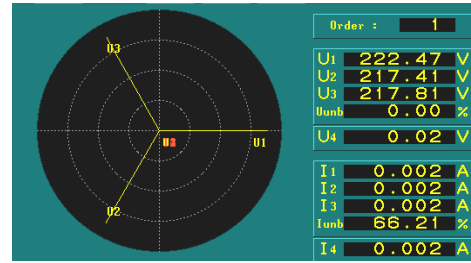
3.1 전압 평형시

그림 1은 콘덴서와 리액터가 연결된 상태에서 전압불평형률이 거의 제로에 가까운 약 0.07[%]에서 HIOKI사의 Power Analyzer(3196모델)로 콘덴서측에서 측정된 전압, 전류 벡터도이다. 그림 1(a)는 리액터와 콘덴서에 전원을 투입하기 전 전원단에서 측정된 전압 벡터도를 나타낸 것이다. 그림 1(b)는 전원을 인가하고서 콘덴서 단에서 측정된 벡터도로서 콘덴서 후단에 리액터를 부착하였기 때문에 전류 위상은 전압벡터에 대하여 늦은 지상을 나타내고 있다.

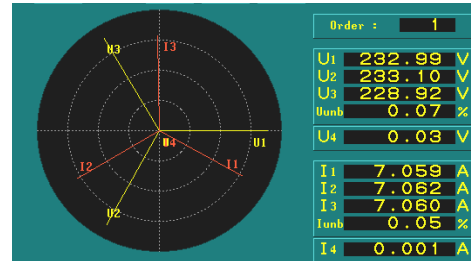
그림 1(a)는 리액터와 콘덴서를 전원을 투입하기 전에 측정한 전압 벡터도로서 상전압은 전압 강하 만큼 낮은 값을 나타내고 있지만, 그림 1(b)와 같이 콘덴서에 리액터를 연결할 경우 콘덴서측의 전압은 상승하였다. 그림 1(b)는 전압이 거의 평형일 경우 기본파 성분의 전압 및 전류 벡터도를 나타낸 것이고, 그림 1(c)는 각 상별 전압(U), 전류(I), 용량(S)과 평균 전압(U_{ave}), 평균 전류(I_{ave}) 그리고 합성용량(S_{sum})을 나타낸 것이다. 콘덴서에 리액터를 연결할 경우 상전압이 당초 220[V]에 비해 약 231[V]로 높아진 것을 알 수 있다. 이 증가한 값은 식 (4)와 (5)를 적용할 경우 계산결과(231.17[V])와 측정결과(231.85[V])와 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 그림 1(c)에서 개별 전압과 전류의 곱은 용량(S)과 합성용량(S_{sum})으로 나타내고 있다.

콘덴서에 리액터를 추가함으로써 전압이 상승하므로 이에 따라 흐르는 전류도 달라진다. 이때 변화된 전류는 식 (6)과 같다.

$$I_c = \frac{V_c}{Z_c} = \frac{V_c}{\left(\frac{1}{2\pi f C}\right)} = \frac{231.17}{\left(\frac{1}{2\pi \times 60 \times 80 \times 10^{-6}}\right)} = 6.97[A] \quad (6)$$



(a) 기본파 전압 및 전류 벡터도(전원 투입전)



(b) 기본파 전압 및 전류 벡터도(전원 투입후)

U1	233.13 V	I1	7.070 A
U2	233.30 V	I2	7.071 A
U3	229.11 V	I3	7.077 A
U _{ave}	231.85 V	I _{ave}	7.073 A
U4	2.15 V	I4	0.114 A
P1	1.434kW	S1	1.648kVA
P2	1.418kW	S2	1.650kVA
P3	1.402kW	S3	1.621kVA
P _{sum}	4.25kW	S _{sum}	4.92kVA

(c) 전압, 전류 및 용량

그림 1 전압 평형시 측정결과

Fig. 1 Measurement results at balance condition

콘덴서에 흐르는 전류에 대한 식 (6)의 계산결과(6.97[A])와 측정결과(약 7.07[A])는 매우 근사한 값을 나타내고 있다.

콘덴서에 리액터를 추가할 경우 전압이 상승하므로 콘덴서에 흐르는 전류도 함께 당초보다 약 5[%]씩 증가하였다. 해석결과와 측정결과와의 전압 상승값은 거의 동일함을 알 수 있다.

콘덴서에 정격전압이 인가될 경우 콘덴서의 용량은 사용한 파라미터를 고려하여 계산할 경우 다음과 같다.

$$Q_1 = 2\pi f C V^2 = 2\pi \times 60 \times 80 \times 10^{-6} \times 220^2 = 1,459.7 [VA] \quad (7)$$

그러나 콘덴서의 전압이 상승할 경우 용량은 식 (4)와 식 (6)의 곱으로서 구하여야 한다.

$$Q_2 = V_c \times I_c = 231.17 \times 6.97 = 1,611 [VA] \quad (8)$$

측정에서 구한 콘덴서 용량은 그림 1(b)에서 $S(U \times I)$ 로서 1.64[kVA]이다. 측정값이 계산값(1.61[kVA])보다 약간 높은 편이다. 콘덴서의 전압 상승 전에 비해 전압이 높아짐에 따라 콘덴서 용량(Q_2)은 당초(Q_1)보다 약 10[%] 정도 상승함을 알 수 있다.

콘덴서에 전압과 전류 증가는 열의 발생과 높은 유전체 스트레스를 주기 때문에 표 1과 같이 전압, 전류, 용량에 대해 동작시간과 연속적인 사용조건에 따라 제한을 두고 있다[6,7].

표 1 콘덴서 허용 전압, 전류 및 용량

Table 1 Admissible voltage, current and reactive power

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
	130%	실효값(고조파 제외)

전압이 평형일 경우 콘덴서에 리액터를 추가하여 전압 상승으로 인한 전압 및 전류의 증가로 용량도 함께 증가한 것을 해석 및 추정을 통해 확인하였다. 상승으로 인한 크기는 표 1에서 제시한 허용범위를 초과하지 않음을 알 수 있다.

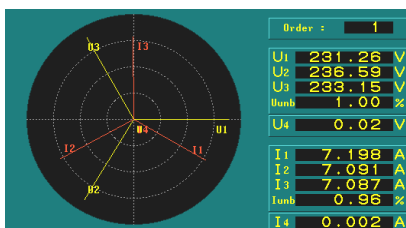
3.2 전압 불평형시

3.2.1 1% 전압 불평형시

전압이 평형일 경우 각 상에 걸리는 전압과 흐르는 전류는 거의 동일하지만, 불평형일 경우 전압 및 전류값이 상별로 다르므로 개별 상에 대한 측정과 분석이 필요하다.

그림 2는 1[%] 전압 불평형이 존재할 경우 콘덴서 측에서의 전압 및 전류를 측정하였다. 기준 220[V]의 상전압에 비해 상별 전압의 크기가 높은 경우 전압 불평형이 콘덴서에 인가될 경우의 측정결과는 그림 2와 같다. 그림 2(a)는 기본파에 대한 전압 및 전류 벡터도를 나타낸 것이고, 그림 2(b)는 상별 전압 및 전류와 용량을 나타낸 것이다.

그림 2에서와 같이 전압 평형에 비해 1[%]의 전압 불평형에 의해 상별 전압의 차이로 인하여 콘덴서 각 상에 흐르는 전류에도 편차가 약간 존재함을 알 수 있다. 그림 2에서 각 상에서 증가한 상전압은 각각 정격보다 105.21[%], 107.65[%], 106.06[%]로서 표 1에서 제시한 값을 초과하지 않으며 전류 또한 정격(6.635[A])을 약간 상회(108, 107, 107[%])하지만 허용 기준안에 들어감을 알 수 있다.



(a) 기본파 전압 및 전류 벡터도



(b) 전압, 전류 및 용량

그림 2 1% 전압 불평형시 측정결과

Fig. 2 Measurement results at 1% unbalance condition

콘덴서의 용량은 그림 2(b)에 나타난 바와 같이 상전압의 평균과 흐르는 평균 전류를 식 (4)와 식(6)을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_1 = U_1 \times I_1 = 231.46 \times 7.207 = 1.668 [kVA]$$

$$S_2 = U_2 \times I_2 = 236.84 \times 7.107 = 1.683 [kVA]$$

$$S_3 = U_3 \times I_3 = 233.34 \times 7.120 = 1.661 [kVA]$$

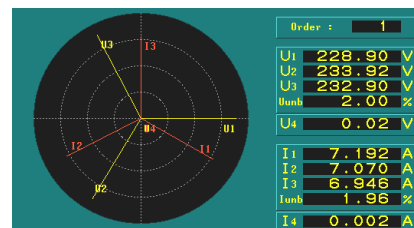
$$S_{sum} = S_1 + S_2 + S_3 = 5.01 [kVA]$$

이들 결과는 그림 1에 비해 약간 높은 값을 나타내고 있다. 당초 80[μF]의 정격에 비해 114.4[%]로서 표 1에서 제시한 허용 범위에 들어간다.

3.2.2 2% 전압 불평형시

그림 3은 2[%] 전압 불평형이 존재할 경우 콘덴서에서의 전압 및 전류를 측정하였다. 그림 3(a)는 기본파에 대한 전압 및 전류 벡터도를 나타낸 것이고, 그림 3(b)는 상별 전압 및 전류와 용량을 나타낸 것이다.

1% 전압 불평형에 비해 최대와 최소 전압의 편차는 거의 같지만, 한상의 기준 전압(229.1[V])이 낮아 평균전압(232.17[V])은 1[%] 전압 불평형에 비해 오히려 낮게 설정되었다. 따라서 전압 불평형율은 2[%]로 약간 높지만, 전압의 크기가 1[%] 전압 불평형율에 비해 낮아 콘덴서에 흐르는 평균 전류(7.106[A])는 낮아지게 된다.



(a) 벡터도



(b) 전압, 전류, 전력 및 역률

그림 3 2% 전압 불평형시 측정결과

Fig. 3 Measurement results at 2% unbalance condition

2[%] 전압 불평형에서 콘덴서에 걸리는 상전압의 평균과 흐르는 평균전류에 대해서는 식 (4)와 식(6)을 이용하여 계산하면 다음과 같다.

$$S_1 = U_1 \times I_1 = 229.11 \times 7.199 = 1.649 [kVA]$$

$$S_2 = U_2 \times I_2 = 234.13 \times 7.118 = 1.667 [kVA]$$

$$S_3 = U_3 \times I_3 = 233.27 \times 7.000 = 1.633 [kVA]$$

$$S_{sum} = S_1 + S_2 + S_3 = 4.95 [kVA]$$

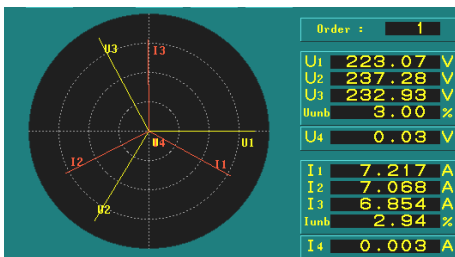
이들 측정 결과는 그림 2(b)에서 측정된 것에 비해 약간 낮은 값을 나타내고 있다. 당초 80[μF]의 정격용량에 비해 113[%]로서 허용 범위에 들어간다.

2[%] 전압 불평형이 1[%] 전압 불평형에 비해 전압, 전류 및 용량의 비율이 낮아진 것은 평균전압의 비율이 낮아짐에 따라 콘덴서에 흐르는 전류가 낮아져 용량도 함께 줄어들기 때문이다.

3.2.3 3% 전압 불평형시

그림 4는 3[%] 전압 불평형이 존재할 경우 콘덴서에서 전압 및 전류를 측정된 것이다. 평균전압은 평형시와 거의 일치하지만, 최대 상전압과 최소 상전압의 편차는 14[V]로 매우 높은 편이다. 따라서 전압 불평형율은 3[%]로 약간 높아 콘덴서에 흐르는 전류에는 약간의 편차가 있다. 한편 기준이 되는 상전압(223.37[V])은 다른 전압 불평형에 비해 낮게 조정되었다.

그림 4(a)는 기본파에 대한 전압 및 전류 벡터도를 나타낸 것이고, 그림 4(b)는 상별 전압 및 전류와 용량을 나타낸 것이다. 그림 4(b)에서 상별 전압은 각각 정격에 비해 101.53[%], 107.95[%], 106.1[%]로 모두 허용범위를 초과하지 않으며, 이들 전압에서 콘덴서에 흐르는 전류도 각각 108.94[%], 107.67[%], 104.37[%] 로 허용 범위에 들어간다.



(a) 벡터도

U ₁	223.37 V	I ₁	7.228 A
U ₂	237.49 V	I ₂	7.144 A
U ₃	233.40 V	I ₃	6.925 A
U _{avg}	231.42 V	I _{avg}	7.099 A
U ₄	0.00 V	I ₄	0.100 A
P ₁	1.399kW	S ₁	1.615kVA
P ₂	1.420kW	S ₂	1.697kVA
P ₃	1.415kW	S ₃	1.616kVA
P _{sum}	4.23kW	S _{sum}	4.93kVA
Q ₁	0.806kvar	PF ₁	0.8663
Q ₂	0.929kvar	PF ₂	0.8366
Q ₃	0.782kvar	PF ₃	0.8753
Q _{sum}	2.52kvar	PF _{sum}	0.8590

(b) 전압, 전류, 전력 및 역률

그림 4 3% 전압 불평형시 측정결과

Fig. 4 Measurement results at 3% unbalance condition

3[%] 전압 불평형시 콘덴서에 걸리는 상전압의 평균과 흐르는 평균전류에 대해서는 식 (4)와 식(6)에서 구하면 다음과 같다. 용량 또한 같은 방식으로 전압과 전류의 곱으로 나타내면 알 수 있다.

$$S_1 = U_1 \times I_1 = 223.37 \times 7.228 = 1.615[kVA]$$

$$S_2 = U_2 \times I_2 = 237.49 \times 7.144 = 1.697[kVA]$$

$$S_3 = U_3 \times I_3 = 233.40 \times 6.925 = 1.616[kVA]$$

$$S_{sum} = S_1 + S_2 + S_3 = 4.93[kVA]$$

이들 결과는 그림 2(b)에서 측정된 것에 비해 약간 낮은 값을 나타내고 있다. 당초 80[μF]의 정격에 비해 112.58[%]로서 표 1에서 제시한 값의 허용 범위에 들어간다.

3.3 전압 불평형에 따른 특성 분석

모든 기기에는 3상 전압이 동일한 값이 인가되는 것이 가장 이상적이지만, 부하의 운전 패턴에 따라 상별 인가되는 전압의 크기가 다를 수 있다. 이와 같이 상별 전압의 크기에 따라 달라지는 값에서 역률 보상 및 고조파 저감을 위해 설치하는 콘덴서와 리액터를 직렬 연결하는 설비에서 전압 불평형에 따른 전압, 전류 및 용량의 변화를 해석 및 측정하였다.

콘덴서에 리액터를 연결할 경우 전압이 상승하는 것은 추가하는 콘덴서에 대한 리액터의 비율에 따라 증가함을 계산과 측정으로 확인하였다. 증가한 전압 및 전류 그리고 용량은 국제 기준에서 제시한 범위에 들어갔다.

상별 전압의 불평형 운전에서 기준이 되는 상보다 낮은 전압값일 경우는 전압 불평형률이 높아질 경우 문제가 되지 않지만, 기준이 되는 상전압이 높고 상별 전압의 크기가 커질 경우 콘덴서에 인가되는 전류도 증가하기 때문에 용량도 함께 증가한다.

본 연구에서는 평형 및 불평형에 대해 각각 측정을 통해 분석한 결과 상별 전압의 크기에 따라 대부분의 경우 어느 한상을 기준으로 하여 전압의 크기가 높지 않는 경우 전압, 전류 그리고 용량은 허용범위를 초과하지 않음을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

전압 불평형은 결상과 같은 특별한 경우를 제외하고는 대개 3[%]이하에서 분포하는 경우가 많다. 그러나 각 상전압이나 선간전압이 정격전압보다 낮은 전압 불평형은 콘덴서에 영향을 주지 않지만 정격전압보다 높은 전압이 단자에 나타날 경우에 대한 영향 분석이 필요하다.

본 연구에서는 콘덴서에 인가되는 전압성분에 고조파 성분이 포함되지 않은 상태에서 전압 불평형만을 고려하여 콘덴서에 리액터의 부착 전후에 따라 전압, 전류 및 용량의 변화를 측정 분석하였다. 측정결과 콘덴서에 리액터를 부착한 경우라도 상전압의 기준되는 상이 크기가 낮은 경우 3[%]의 전압 불평형률에서도 허용기준 이내에 존재함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- [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] 김종겸, 박영진, "비대칭 전압 불평형에 의한 콘덴서 동작 특성", 대한전기학회 논문지 제 59(P)권, No.1, pp.18-23, 2010.3
- [4] 김일중, 김종겸, "불평형 전압 운전시의 역률 보상을 콘덴서 특성 연구", 대한전기학회 논문지 제 57(P)권, No.1, pp.36-40, 2008.3

- [5] Thomas M. Blooming, "Capacitor Application Issues", IEEE Trans on IAS, Jul-Aug, pp.1013-1026, 2008
- [6] IEEE Std 18-2002, "IEEE Std For Shunt Power Capacitors"
- [7] JIS C-4902, "고압 및 특별고압 진상 콘덴서 및 부속기기", 1998

저 자 소 개



김 일 중 (金 一 中)

1958년 12월 10일생. 1980년 충남대학교 전기공학과 졸업. 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1992년~2005년 주성대학 전기과 교수. 2006년 (주)일신엔지니어링 기술연구소장. 2007년~현재 호서대학교 기계공학과 교수
 Tel : 041) 540-5805
 Email : ijkim@hoseo.edu



김 종 검 (金 宗 謙)

1961년 10월 3일생. 1984년 동아대학교 전기공학과 졸업. 1996년 충남대학교 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1996년~현재 강릉원주대학교 전기공학과 교수. 현재 당학회 평의원, B부문 총무이사
 Tel : 033) 760-8785
 E-mail : jgkim@gwnu.ac.kr



박 영 진 (朴 永 鎭)

1959년 11월 19일생. 1982년 단국대학교 전기공학과 졸업. 1996년 단국대학교 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1996년~현재 강릉원주대학교 전기공학과 교수.
 Tel : 033) 760-8784
 E-mail : popspark@gwnu.ac.kr



김 성 헌 (金 成 憲)

1954년 9월 10일생. 1981년 숭실대학교 전기공학과 졸업(학사). 1983년 숭실대학교 전기공학과 졸업(석사). 1999년 충남대학교 전기공학과 졸업(공박). 1986년~현재 공주대학교 전기전자제어공학부 교수
 Tel : 041) 521-9166
 Email : shkim3456@kongju.ac.kr