

전력품질 개선 및 부하 분담 기능을 갖는 계통 연계형 소규모 에너지 저장 시스템

論 文
54B-8-6

Grid-interactive Small Battery Energy Storage System with High Power Quality and Demand Side Management

高 晟 勳^{*} · 辛 泳 燦^{*} · 李 星 龍^{**}

(Sung-Hun Ko · Young-Chan Shin · Seong-Rvong Lee)

Abstract - This paper deals with the grid-interactive small battery energy storage system, which aims at the integration of power quality improvement and demand side management. The main purpose of the proposed system is to achieve the peak power cutting and to compensate the current harmonics and reactive power at the point of installation on power distribution for residential homes. paper deals with the grid-interactive small battery energy storage system,

In this paper, the basic principle and control algorithm is analyzed, theoretically and the design methodology of the system is discussed. To verify the proposed system, a comprehensive evaluation with theoretical analysis, simulation and experimental results for 1 KVA load capacity is presented.

Key Words : Power Conditioning, DSM, CCVSI, 에너지 저장 시스템,

1. 서 론

최근, 산업 및 정보통신의 발전과 소득수준의 향상으로 문화적 편리성에 대한 소비자들의 요구가 증대함에 따라 전형적인 비선형 부하인 조명기기 및 디지털 가전기기와 에어컨과 같은 전동기 가변속 구동기기의 보급이 급격하게 확대되고 있는 실정이다. 이와 같은 비선형 부하의 급증은 계통 전원의 고조파를 증가시키고 역률을 감소시킴으로써 계통의 전력품질은 물론 전기기기의 오동작 그리고 변압기 및 전력변환기의 정격용량증가 등의 문제점이 발생하게 된다. 또한, 에어컨, 전기난로 등과 같은 계절 및 시간에 따른 단속적 사용기기의 증가는 짧은 시간에 집중적인 첨두부하전력을 요구하게 되어 전체 발전설비용량을 증가시키는 원인으로 에너지의 97[%]이상을 수입하는 우리나라의 경우 커다란 사회 문제로 인식되고 있다[1-3].

이에 따라 배전계통 전력품질을 개선시키는 방법으로는 능동전력필터 및 UPQC(Unified Power Quality Conditioner) 등의 연구가, 첨두 전력부담 또는 친환경적인 에너지 공급을 위한 방법으로는 대체에너지 시스템에 관한 연구가 최근 들어 각각 활발하게 진행되고 있다[4-6]. 하지만, 능동전력필터는 상대적으로 시스템 가격이 고가이고, 대체 에너지 시스템으로 대표적인 태양광 발전 같은 경우 변환효율이 14[%]로 낮을 뿐만 아니라 1[W]당 가격이 만원 내외로 초기 설

치 투자비가 높기 때문에 비교적 소용량인 주택에 적용하기 어려울 뿐 아니라 첨두부하의 대부분을 사용하고 있는 도심은 밀도가 매우 높아서 대체에너지 설치 장소도 적합하지 않아 대규모로 보급되기 어려운 실정이다. 또한, 이들은 각각 그 적용목적에 따라 별도로 개발되고 있기 때문에 계통의 전력품질과 첨두부하 부담 모두를 해결할 수 없는 문제점이 있다. 이를 해결하기 위해서는 다음과 같은 사항을 모두 만족하는 시스템의 개발이 필요하다.

1) 배전 계통의 전력 품질

IEEE standard-1159에서 요구하는 배전계통의 전력품질(역률 0.95 이상, 전압 및 전류의 고조파 5% 이내)을 만족시킬 수 있어야 한다.

2) 첨두부하분담

가정용 전력 소비행태에서, 평균소비전력 대비 최대 30 [%]정도를 초과하는 첨두부하를 일정부분 분담하여 전력공급 여력을 확보할 수 있어야 한다.

그러므로, 본 연구에서는 이상의 계통 전원의 품질개선 및 첨두부하전력의 감소 모두를 만족시킬 수 있는 계통 연계형 소규모 에너지 저장 시스템을 제안 한다. 제안된 시스템은 배터리와 전류제어형 전압원인버터(CCVSI: Current Controlled Voltage Source Inverter)로 구성되며, CCVSI의 양방향 전력수수에 의하여 1) 첨두 부하 시, 배터리전력에 의하여 계통전력의 부담을 가능한 최소화하고, 2) 낮은 부하 시, 계통의 전력여유분에 의해 배터리에 전력을 충전하며, 3) 이 두 가지 기능과 동시에 전 부하 영역에서 계통 전력 품질개선을 수행하는 세가지 모드로 운전된다. 따라서, 본 논문에서는 제안된 소규모 에너지 저장 시스템의 동작원리 및 부하 조건에 따른 제어 알고리즘을 이론적으로 해석하고 소비전력 사용행태에 따른 시스템 용량의 적정 설계 방법에 대하여 논의하였다. 또한, 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램인

^{*} 교신저자, 正會員 : 群山大 工大 電子情報工學部 博士課程

E-mail : merchin@kunsan.ac.kr

^{*} 學生會員 : 群山大 工大 電子情報工學部 碩士課程

^{**} 正會員 : 群山大 工大 電子情報工學部 教授 · 工博

接受日字 : 2005年 5月 11日

最終完了 : 2005年 7月 16日

PSIM을 이용하여 시스템의 유용성을 확인하였고, 실제 1[KVA]급 에너지 저장 시스템을 제작하여 실험을 통해 계통의 품질 개선뿐만 아니라 전력흐름(power flow)을 통합적으로 제어할 수 있음을 보임으로써 제안된 시스템의 유용성을 입증하였다.

2. 소규모 에너지 저장 시스템

본 연구에서는 각각 독립적으로 연구·개발 되고 있는 능동전력필터와 대체 에너지 시스템의 장점을 최대한 살리면서 가격대비 활용도를 극대화하여, 기존의 능동전력필터의 PCS(Power Conditioning System) 기능인 전력품질 개선(계통의 THD 감소 및 역률 향상)뿐 아니라 대체 에너지 시스템의 DSM(Demand Side Management) 기능을 이용한 침투부하시 부하분담 기능을 갖는 소규모 에너지 저장 시스템을 제안하였다.

그림 1은 본 연구에서 제안한 배터리를 이용한 소규모 에너지 저장 시스템의 전체 구성도이다. 제안된 시스템은 크게 에너지를 저장할 수 있는 배터리와 전류를 직접 제어할 수 있는 단상 전류 제어형 전압원 인버터 그리고 시스템 제어를 위한 디지털 제어기로 구성된다. 계통과 인버터는 변압기로 분리되어 있으며 배터리의 전압에 따라 권수비를 결정할 수 있다.

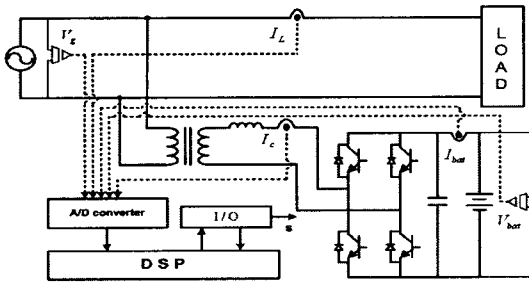


그림 1 제안된 시스템의 전체 구성도
Fig. 1 Block diagram of the proposed system

2.1 시스템 해석 및 제어 알고리즘

그림 2와 3은 본 연구에서 제안한 시스템(그림 1)의 등가회로와 동작모드에 따른 벡터도이다. 제안된 시스템은 기본적으로 계통의 품질 향상을 위한 PCS 기능을 수행하면서 부하분담 제어를 수행하게 되는데 이는 PCS와 DSM 모드로 구분할 수 있다. 또한, DSM 모드는 계통의 최대전력을 감소시키기 위해 부하에 전력을 공급하는 방전 모드[그림 3(b-i)]와 배터리에 전력을 저장하는 충전 모드[그림 3(b-ii)]로 구분할 수 있다.

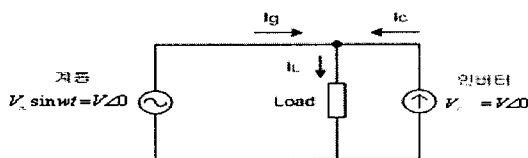


그림 2 시스템의 등가회로도
Fig. 2 Equivalent circuit diagram of the system

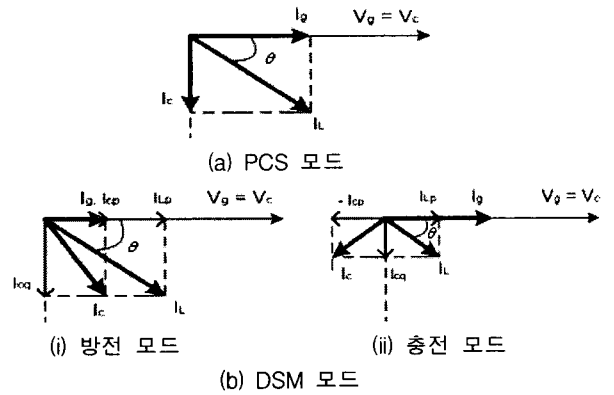


그림 3 동작모드에 따른 벡터도
Fig. 3 Phasor diagram of the system at each operation mode

전류 제어형 인버터는 그림 2의 등가회로와 같이 AC 전류원으로 해석이 가능하며 계통 전압(Vg), 부하 전압(VL) 및 인버터 전압(Vc)은 병렬로 연결된 형태로 크기 및 위상이 같으며, 부하 전류(IL)는 계통 전류(Ig)와 인버터 전류(Ic)의 합으로 식 (1)과 같다.

$$\vec{I}_L = \vec{I}_g + \vec{I}_c \tag{1}$$

한편, 계통 전류를 유효 및 무효 성분으로 표현하면 식 (2)와 같다.

$$\vec{I}_g = \vec{I}_L - \vec{I}_c = (I_{Lp} - I_{cp}) + j(I_{Lq} - I_{cq}) \tag{2}$$

여기서, 첨자 p는 각 전류의 유효성분, 첨자 q는 각 전류의 무효성분을 나타낸다.

그림 3의 (a)처럼 계통의 품질을 향상시키기 위한 PCS 모드에서는 항상 계통 전류(Ig)는 유효 전류(Igp)만을 공급해야 하므로 계통 전류 Ig는 부하에서 요구하는 유효전류(ILp = Igp)성분만을 포함하며 인버터 전류 Ic는 부하에서 요구하는 무효전류(ILq = Icq)성분만을 공급한다. 따라서, 계통 전류는 부하 조건에 관계없이 항상 유효전력성분만을 공급할 수 있으며 다음과 같이 구할 수 있다.

$$I_g^* = \text{Re}[I_L] = \frac{P_L}{V_g} \tag{3}$$

그러므로, 전류제어형 인버터가 계통의 고조파 및 역률 개선을 위하여 PCS 기능을 수행하는데 요구되는 전류 IL*은 식 (4)와 같이 표현된다.

$$\vec{I}_c^* = j\text{Im}[I_L] = j\frac{Q_L}{V_g} \tag{4}$$

여기서, PL은 부하유효전력이며 QL은 부하무효전력이다.

또한, 그림 3의 (b)처럼 DSM 모드에서는 부하조건에 따라 배터리를 이용하여 전력을 공급하거나 저장할 수 있으며,

PCS 기능도 동시에 수행한다. 그림 3의 (b-i)는 배터리의 전력을 방전하는 모드로 부하 유효전력성분의 일부를 배터리가 분담하기 때문에 첨두 부하시에 요구되는 계통의 전력 $[P_L - P_{bat}]$ 을 일정부분 감소시킬 수 있으며 무효전력은 인버터에서 전부 부담하게 된다. 그림 3의 (b-ii)는 배터리에 전력을 충전하는 모드로 낮은 부하일 때 계통의 유효전력은 부하 및 배터리에 공급 $[P_L + P_{bat}]$ 되고 부하의 무효전력은 인버터에서 전부 부담하게 된다. 따라서, PCS와 DSM을 동시에 수행하는데 요구되는 계통전류 및 인버터 전류는 각각 식 (5)와 (6)으로 구할 수 있다.

$$I_g^* = \text{Re}[I_L] \mp \text{Re}[I_c] = \frac{P_L \mp P_{bat}}{V_g} \quad (5)$$

$$\vec{I}_c^* = (\text{Re}[I_L] - I_g^*) + jI_m[I_L] = \frac{\pm P_{bat}}{V_g} + j \frac{Q_L}{V_g} \quad (6)$$

그러므로, 전류 제어형 인버터의 전류를 제어함으로써 계통 전류의 고조파를 상쇄시키고 역률을 항상 1로 유지시킬 수 있으며, 부하조건 및 배터리의 상태에 따라 전력을 공급 또는 저장이 가능하다. 그림 4는 제안된 시스템의 제어 알고리즘 블록도이다.

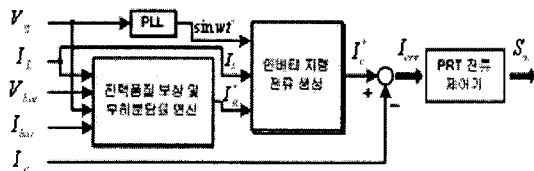


그림 4 시스템 제어 알고리즘 블록도
Fig. 4 Control algorithm block diagram of the system

제안된 시스템의 제어 알고리즘은 부하조건 및 배터리의 상태에 따라 인버터 지령 전류 (I_c^*) 를 생성하여 PCS와 DSM 기능을 수행하는 계통 제어 알고리즘과 실제 인버터 전류를 지령 전류 I_c^* 에 따라 추종하도록 PWM 스위칭 패턴을 생성하는 스위칭 제어 알고리즘으로 구분할 수 있다. 계통 제어 알고리즘에서 필요한 정보는 계통 전압 (V_g) 의 위상 및 크기, 부하 조건 (V_g, I_L) 및 배터리의 전력 (V_{bat}, I_{bat}) 이다. 이러한 측정된 값을 이용하여 계통의 유효전력을 계산하고 부하조건 및 배터리의 상태에 따라 식 (5)를 이용하여 유효전력 제어를 위한 계통 전류 I_g^* 를 연산하며, 계산된 전류 I_g^* 및 측정된 인버터 전류 I_L 그리고 PLL에 의해 계통 전압과 동기화된 위상정보 $(\sin wt^*)$ 를 가지고 식 (6)에 의해 최종적인 인버터 지령 전류 I_c^* 를 생성하게 된다. 이에 따라 인버터 지령 전류를 추종하도록 PWM 스위칭 패턴을 생성하는 스위칭 제어 알고리즘을 수행한다. 일반적으로 실제 전류와 지령 전류의 오차 신호 (I_{err}) 만을 가지고 PWM 스위칭 패턴을 생성하는 전류 제어 알고리즘으로 히스테리시스 기법을 많이 사용하는데 이는 하드웨어가 간단하고 쉽게 구현할 수 있는 장점이 있지만 가변 스위칭 주파수 문제 등의 단점을 갖고 있다. 이를 보완하면서 전류제어의 장점인 빠른 응답 특성 및 인버터 DC 입력 전압의 변동에도 강인하게 전류를 제어할 수 있는 PRT (Polarized Ramp Time) 전류 제어기

[4]가 제시되었다. 따라서, 본 연구에서는 인버터의 전류를 제어하는 전류제어기로 PRT 전류제어기를 사용하였다.

2.2 시스템 용량 선정

본 연구에서 제안한 소용량 에너지 저장 시스템의 소형경량화를 위해서는 적절한 배터리와 인버터의 용량을 선정할 필요가 있다. 제안된 시스템에서 배터리에 요구되는 방전전력은 짧은 시간에 집중되어 있는 첨두 부하전력만을 담당하게 되므로, 평균전력 대비 초과 최대전력 용량 및 최대전력 지속시간을 분석하여 적절한 배터리 용량을 선정할 수 있다. 그림 5는 우리나라의 년 평균 소비전력 및 발전설비 현황을 나타낸다[1]. 2004년도 평균전력 대비 초과 최대전력 사용비율은 년 평균 19.4%이며, 7·8월 같은 경우에는 약 28%로 2003년도의 최대전력 사용량보다 8.2%가 증가했으며, 이러한 추세는 지구 온난화의 영향으로 년평균 기온이 상승하고 소득수준의 향상으로 고전력 전기기기 사용이 급증하고 있는 점을 감안하면 당분간 지속될 것으로 예상할 수 있으며 최대전력 수요량을 충족시키기 위해서 발전설비도 따라서 증가하고 있음을 알 수 있다.

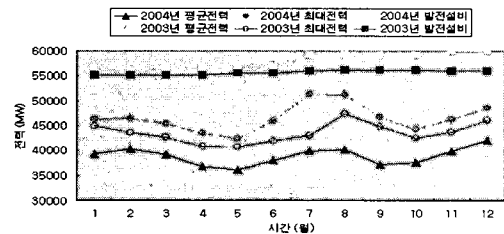


그림 5 소비전력 및 발전설비 분석
Fig. 5 Trend of the power supply and demand

따라서, 발전설비를 최적화하기 위해서는 최대전력 사용량을 평균전력 소비량에 근사하도록 유지해야 하며 이를 위해서는 평균전력 대비 최대 약 30%용량의 에너지 저장 시스템이 필요하다. 가정용 평균소비전력을 한국전력의 “전력통계속보”[1]에 의하여 추정 계산하면 약 746[W]이고, 평균역률을 0.8로 가정하면 여유마진을 고려한 가구당 소비용량을 1[KVA]로 산정할 수 있다. 따라서, 본 소규모 에너지 저장 시스템에 필요한 인버터와 배터리의 용량은 식 (7)과 (8)에 의해 결정이 가능하다.

$$\text{인버터용량}(KVA) = \sqrt{(\text{부하분담전력})^2 + (0.6 * \text{가구당 소비전력})^2} \quad (7)$$

$$\text{배터리용량}(Ah) = \frac{\text{전체배터리부하량}(Wh)}{\text{평균방전전압}(V) * \text{배터리방전효율}(\eta)} \quad (8)$$

여기서, 시스템의 부하분담전력을 산정하는 문제는 최대 소비전력의 부하분담비율과 실제 시스템의 가격 등을 고려하여 결정해야 한다. 하지만, 본 연구의 주목적이 시스템의 최적설계가 아니고 전력품질 개선을 위한 PCS 기능과 첨두 부하를 분담하는 DSM 기능을 통합하는 시스템을 제안하는데 있기 때문에 본 연구에서는 임의로 부하분담전력을 500[W]로 결정하고, 가구당 소비용량의 평균 역률을 0.8로 가정하여 인버터 용량을 1[KVA]로 결정하였다. 또한, 최대

전력 사용량은 14~16시 사이의 2시간 정도에 집중적으로 분포하는 특징[2]을 가지고 있기 때문에 시스템의 배터리 용량은 실제 수용가의 평균전력 중 500[W]를 최대 2시간 동안 공급할 수 있도록 식 (8)에 의해 산정할 수 있다. 이에 따라 본 연구에서는 12[V], 8[AH] 배터리를 15개 직렬 연결하여 사용하였다.

3. 시뮬레이션 및 실험 결과

본 연구에서 제안한 계통 연계형 소규모 에너지 저장 시스템의 유용성을 확인하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션 및 1[KVA]급 시작품을 제작 실험하였으며 조건은 표 1과 같다. 특히, 본 연구에서 제안된 시스템은 IEEE 전력품질 표준[3]을 참고하여 계통 전류의 THD는 5[%]이하, 역률은 0.95이상 그리고 첨두 부하시 부하 분담 500[W]를 할 수 있도록 설계하였다.

먼저 제안된 시스템의 유용성을 확인하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램인 PSIM을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. PSIM 프로그램은 C언어로 코딩이 가능한 DLL 파일을 이용하면 실제 DSP로 구현한 시스템과 비슷한 동작 특성을 얻을 수 있다.

표 1 시뮬레이션 및 실험 조건

Table 1 The condition of the simulation and experiment

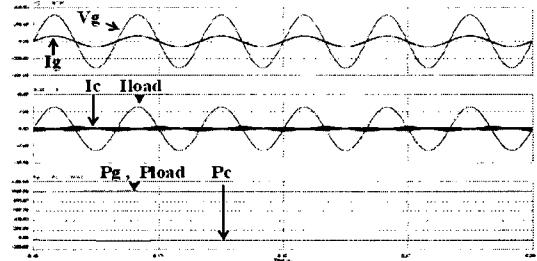
Prameter	Value	Prameter	Value
계통 전압	220[VAC]	기본주파수	60[Hz]
배터리 전압	180[VDC]	스위칭주파수	5[KHz]
결합 인덕터	6[mH]	DC 링크콘덴서	1000[uF]
변압기	1:2	부하용량	1[KVA]

3.1 시뮬레이션 결과

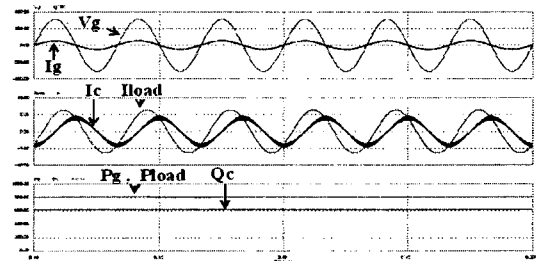
제안된 시스템의 유용성을 확인하기 위하여 1[KVA]급의 선형 및 비선형 부하를 이용하여 부하조건에 따른 PCS 및 DSM 동작을 시뮬레이션 하였다. 그림 6은 부하조건에 따른 계통의 품질을 개선하기 위한 PCS 동작을 수행한 결과 파형이다. 그림 6의 (a)와 (b)는 순수저항(R) 및 유도성(R-L) 부하조건에 대한 시뮬레이션 파형으로 위로부터 계통전압(V_g) 및 계통전류(I_g), 부하전류(I_L) 및 인버터 전류(I_c) 그리고 계통 유효전력(P_g) 및 부하 유효전력(P_L)과 인버터 유효전력(P_c) 또는 무효전력(Q_c , 그림 (b))이다. 또한, 그림 6의 (c)와 (d)는 비선형 부하로 그림 6 (c)는 유도성 정류기 부하이며 그림 6 (d)는 콘덴서 입력형 정류기 부하로 위에서부터 계통전압 및 전류, 부하 전류 그리고 인버터 전류이다.

그림 6 (a)는 순수저항부하로 부하 유효전력은 계통에서 전부 부담하며 무효전력은 없기 때문에 인버터는 동작하지 않는다. 이 때, 인버터 출력단에 위치한 결합 인덕터의 영향으로 인버터의 전류는 "0"이 아니다. 그림 7 (b)는 부하용량은 같으면서 부하 각이 36.9°인 역률 0.8(지상)의 유도성 부하로 부하 전력은 800[W]의 유효전력성분과 600[W]의 무효전력성분으로 구성된다. 따라서, 인버터는 PCS 동작을 수행하여 부하의 무효전력성분을 보상하고 계통 전력은 유효전

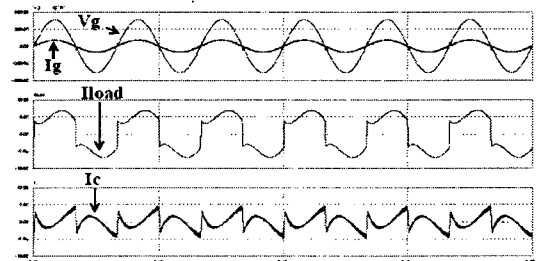
력성분만을 부하에 공급하고 있음을 알 수 있다. 또한, 그림 6의 (c)와 (d)에서 부하전류는 왜곡이 많은 비선형 특성을 나타내고 있지만 인버터 전류 I_c 가 부하 전류의 무효성분을 보상함으로써 계통전류는 왜곡 없는 정현파임을 알 수 있다.



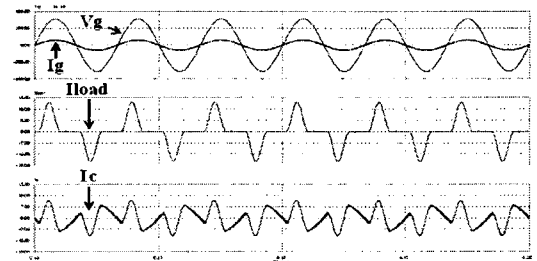
(a) 저항 부하시 (R:48[Ω])



(b) 유도성 부하시 (Z: 48∠36.9° [Ω])



(c) 비선형 부하시 (유도성 정류기)



(d) 비선형 부하시 (콘덴서 입력형 정류기)

그림 6 PCS 모드시 동작파형

Fig. 6 Operation waveforms of the PCS mode

그림 6의 PCS 동작 시뮬레이션 결과를 보면 계통 전압과 전류는 위상차 없는 정현파로 제안된 시스템은 부하조건에 상관없이 단위역률(unity PF)의 유지가 가능함을 확인할 수 있었다.

그림 7과 8은 비선형 부하시 계통전류의 고조파 스펙트럼(FFT) 파형이다. 그림 7은 유도성 정류기 부하조건, 그림 8은 콘덴서 입력형 정류기 부하조건일 때의 계통전류의 FFT 파형으로 비제어시의 THD는 약 32.2[%]와 67.6[%]이며, 제안된 시스템의 PCS 동작을 수행할 때의 THD는 약 3.2[%]

와 1.1[%]이다. 이는 계통 전류에 대한 IEEE 표준[3] 및 본 연구의 설계 목표인 5[%]이하를 만족하고 있음을 보여준다

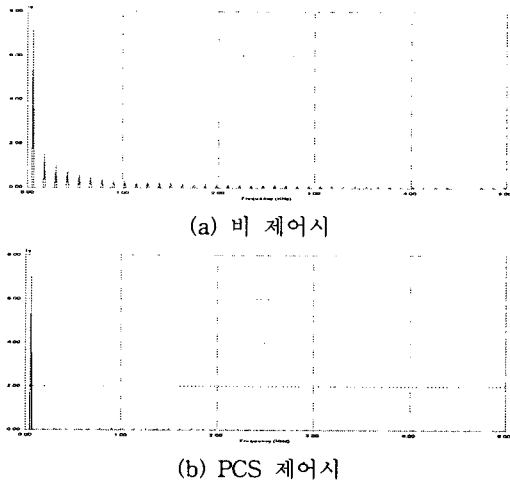


그림 7 비선형 부하시(유도성) 계통전류의 FFT 파형
Fig. 7 FFT waveforms of the grid current at non-linear load

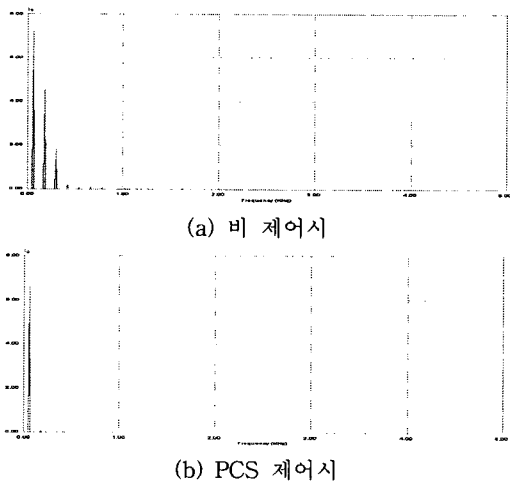
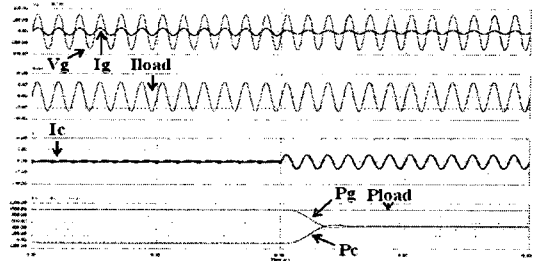
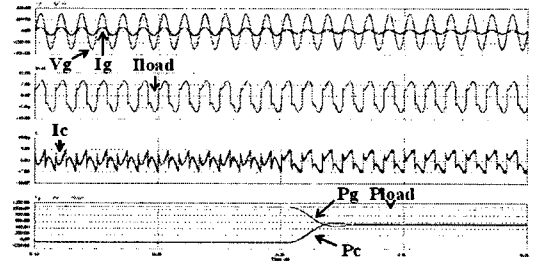


그림 8 비선형 부하시 계통 전류의 FFT 파형(콘덴서 입력형 정류기)
Fig. 8 FFT waveforms of the grid current at non-linear load

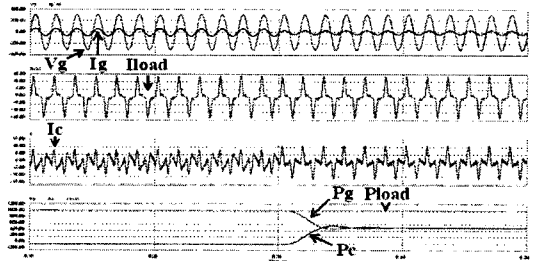
그림 9는 부하에 전력을 공급하는 DSM 동작 시뮬레이션 파형으로 제안된 시스템이 PCS 기능을 수행하면서 유효전력도 공급할 수 있음을 보여주고 있다. 그림 9 (a)는 순수저항부하 일 때의 시뮬레이션 파형으로 부하 전력의 100 [%] 중 계통이 50[%]를 공급하고 나머지 50[%]를 배터리에 저장된 에너지를 이용하여 인버터가 공급하고 있음을 확인할 수 있다. 그림 9의 (b)와 (c)는 비선형 부하 일 때의 DSM 파형으로 그림 6의 (c), (d)와 같은 부하조건이다. 그림 9의 (b)와 (c)의 부하전류는 왜곡이 많은 비선형 특성을 보여주고 있지만 계통전류는 인버터의 무효전력보상을 통해 정현파 특성을 보여주고 있음을 확인할 수 있으며, 계통 및 부하 그리고 인버터의 유효전력을 살펴보면 부하의 유효전력을 계통과 인버터가 각각 50[%]씩 부담하고 있음을 확인할 수 있다. 이는 제안된 시스템이 PCS 기능을 수행하면서 배터리의 에너지를 이용하여 부하에 전력 공급이 가능함을 확인할 수 있다.



(a) 저항 부하시



(b) 비선형 부하시 (유도성 정류기 부하)

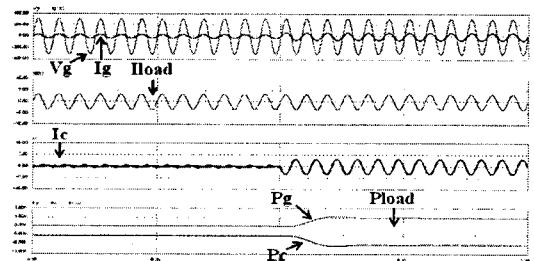


(c) 비선형 부하시 (콘덴서 입력형 정류기 부하)

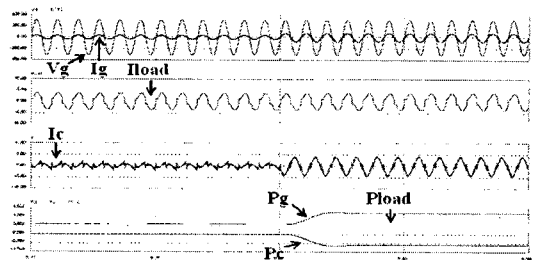
그림 9 DSM(방전) 모드시 동작파형

Fig. 9 Operation waveforms of the DSM(discharging) mode

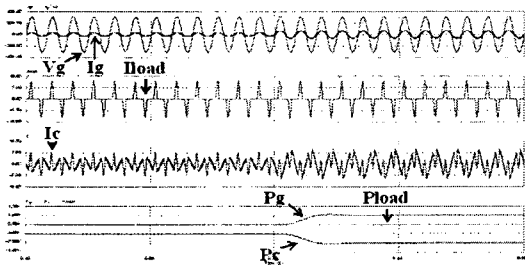
그림 10은 배터리에 전력을 충전하는 DSM 동작파형으로 제안된 시스템이 PCS 기능을 수행하면서 낮은 부하시(유효전력 50%)에 전력을 저장할 수 있음을 보여준다.



(a) 저항 부하시



(b) 비선형 부하시 (유도성 정류기 부하)



(c) 비선형 부하시 (콘덴서 입력형 부하기 부하)

그림 10 DSM(충전) 모드시 동작파형

Fig. 10 Operation waveforms of the DSM(charging) mode

그림 10은 그림 9와 비교해서 부하전력이 50[%]감소된 부하조건으로 전력흐름을 살펴보면 부하전력은 500[W]로 일정한 상태이며 1[kW]로 증가한 계통전력의 50[%]는 인버터로 공급됨을 알 수 있다. 이때 인버터 전류는 계통전류와 180° 위상차를 가짐으로써 배터리에 에너지를 저장하고 있음을 확인 할 수 있다. 제안된 시스템의 배터리 충전모드 DSM 동작은 평균전력보다 낮은 부하시 계통의 잉여전력을 저장하는 방식으로 부하조건에 따라 평균전력을 초과하지 않는 범위에서 충전 전력의 비율을 결정하게 되며 본 연구에서는 방전 및 충전 모드를 비교하기 쉽게 하기 위하여 각각 유효전력의 50[%]조건으로 시뮬레이션 하였다. 그림 10의 (b)와 (c)는 비선형 부하로 부하전류는 왜곡된 파형이지만 계통전류는 정현파임을 확인할 수 있다. 또한, 계통의 유효전력은 각각 50[%]씩 부하와 인버터로 공급됨을 알 수 있다. 이는 제안된 시스템이 계통의 고조파 및 역률을 개선시키면서 낮은 부하시 계통의 잉여전력을 배터리에 충전 할 수 있음을 알 수 있다.

3.2 실험 결과

이상과 같이 시뮬레이션 결과를 통해 검증된 제어 알고리즘을 그림 11과 같이 실제 1[KVA]급 시작품을 제작 실험하였다. 인버터는 단상 풀-브릿지 타입으로 스위칭 소자는 IGBT를 사용하였고 배터리는 12[V] 8[AH]급 15개를 직렬 연결하여 구성하였다. 전압 및 전류 센서는 LEM사의 LV25P와 LA25P를 이용하였으며 전체 시스템의 제어기로 TI사의 DSP320C31을 사용하였고 실험조건은 시뮬레이션 조건과 같다.

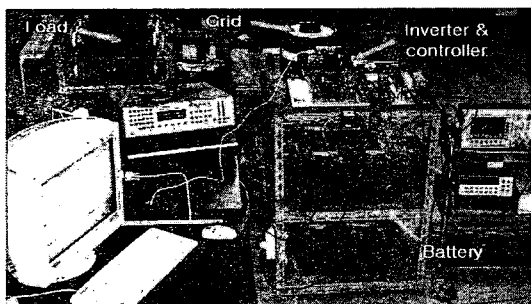
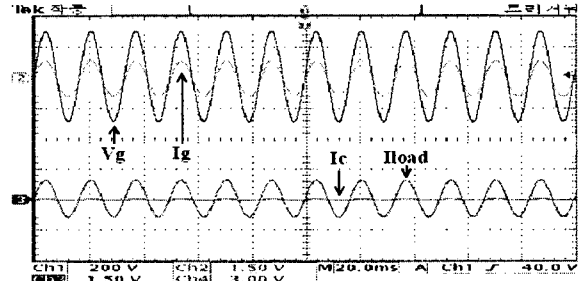


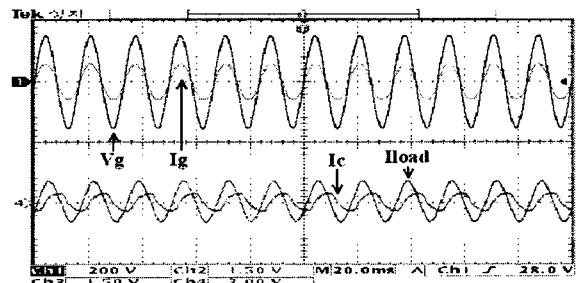
그림 11 제안된 시스템의 실험사진

Fig. 11 Photograph of the proposed system

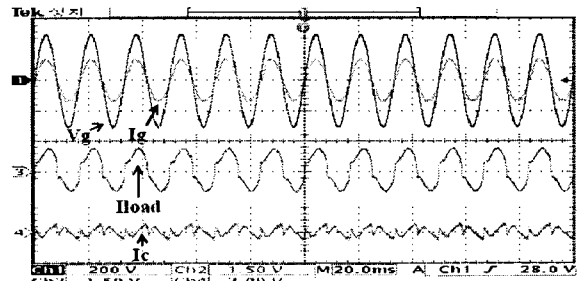
그림 12는 PCS 동작의 실험 결과 파형으로 파형 측정은 Tektronix사의 4채널 디지털 스코프인 TDS3054B를 사용하였고 THD와 역률 및 전력 측정은 Voltech사의 PM3000 전력분석기를 이용 하였다.



(a) 저항 부하시 (R:48[Ω])



(b) 유도성 부하시 (Z: 48∠36.9° [Ω])



(c) 비선형 부하시 (유동성 정류기)

그림 12 PCS 모드 동작 실험 파형

Fig. 12 Experiment waveforms of the PCS mode

그림 12(a)는 순수저항 부하시, (b)는 부하용량은 같으면서 부하각이 36.9°인 유도성 부하조건 일 때의 실험 파형으로 위로부터 계통 전압 및 전류, 부하 전류 및 인버터 전류이다. 그림 12 (a), (b)는 부하에서 필요한 유효전력성분은 계통에서 공급하고 무효전력성분은 인버터에서 공급하는 것을 보여주고 있다. 여기서, 전류 파형의 크기가 전압 대비인 이유는 센서를 통해 전류를 전압 형태로 표현한 것으로 스코프상 전압 대 전류의 대비 비율은 약 1:7 정도이며 인버터 전류는 1:2 변압기의 권수비에 따라 대비 크기는 2배이다. 그림 12 (c)는 비선형 부하시의 PCS 동작 실험파형으로 위로부터 계통전압 및 전류, 부하전류 그리고 아래 파형은 인버터 전류 파형으로, 가운데 파형인 부하전류 IL은 비선형적인 왜곡된 파형을 보여주고 있지만 아래쪽의 인버터 전류를 통한 무효전력 보상으로 계통 전류의 파형은 정현파임을 알 수 있다. 또한, 계통전압과 전류는 위상차가 거의 "0"임을 확인할 수 있다.

그림 13은 그림 11 (c)의 계통 전류의 FFT 스펙트럼 파형으로 TDS3054B의 MATH 기능에서 제공하는 FFT 모듈을 사용하였다. PCS 동작의 실험 결과 파형으로 파형 측정은 Tektronix사의 4채널 디지털 스코프인 TDS3054B를 사용하였고 THD와 역률 및 전력 측정은 Voltech사의 PM3000 전력분석기를 이용 하였다.

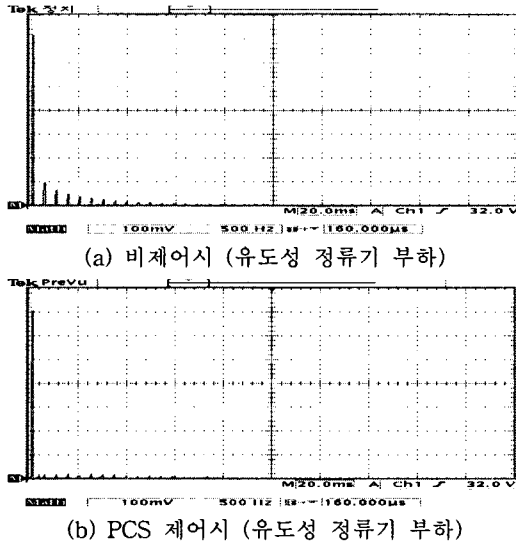


그림 13 비선형 부하시 계통전류의 FFT 파형
Fig. 13 FFT waveforms of the grid current at non-linear load

그림 12처럼 제안된 시스템의 PCS 동작시 계통의 역률 및 THD를 PM3000으로 측정한 결과 계통의 역률은 항상 0.99이상을 유지하고 전류의 THD도 대체로 시뮬레이션 결과에 근접하고 있음을 알 수 있었다. 다만, 그림 12 (c)와 같은 비선형 부하시에 THD는 4.2[%]로 다소 높게 측정되었는데, 이는 계통전류의 “0” 교차점(zero crossing)에서 약간의 서지 전류가 발생하기 때문이다. 이는 유동성 정류기 부하의 특징으로 “0” 교차점에서 급격한 전류증가에 따른 문제로 계통의 입력 필터나 리액터를 추가하거나 인버터의 스위칭 주파수를 증가시켜 인버터 전류의 동특성을 향상시키면 해결이 가능하다. 따라서, 실험과 시뮬레이션의 결과를 종합하면 제안된 시스템의 PCS 기능은 선형 또는 비선형 부하 조건에서도 계통 역률을 항상 0.99로 유지시키면서 THD는 5[%]이하로 당초 IEEE 표준 및 본 연구의 설계 조건에 부합함을 알 수 있다.

그림 14는 PCS 및 DSM 기능을 동시에 수행하는 실험 파형으로 그림 14 (a)는 부하에 전력을 공급하는 모드이며 그림 14 (b)는 에너지를 충전하는 모드이다. 그림 14 (a)는 그림 12 (a)와 같은 부하조건으로 부하전류는 동일하지만 계통 전류와 인버터 전류의 크기는 차이가 있는데, 이는 시스템이 무효전력보상 기능을 수행하면서 부하유효전력의 50[%]를 부담하고 있기 때문이다. 또한, 그림 14 (b)는 그림 14 (a)의 50[%] 부하조건으로 인버터는 무효전력보상 기능을 수행하면서 계통유효전력의 50[%]를 공급받아 배터리에 저장하고 있음을 알 수 있다.

그림 15는 제안된 시스템의 제어응답을 알아보기 위한 실험파형으로 그림 15 (a)는 PCS 기능을 수행하다가 전력을

공급하는 모드로, 그림 15 (b)는 에너지를 충전하는 모드로 전환되는 파형으로 위로부터 계통전압, 계통전류, 부하전류 그리고 인버터 전류를 나타낸다. 그림 15에서 알 수 있듯이 전류 제어 알고리즘의 장점인 빠른 응답 특성을 보여주고 있다.

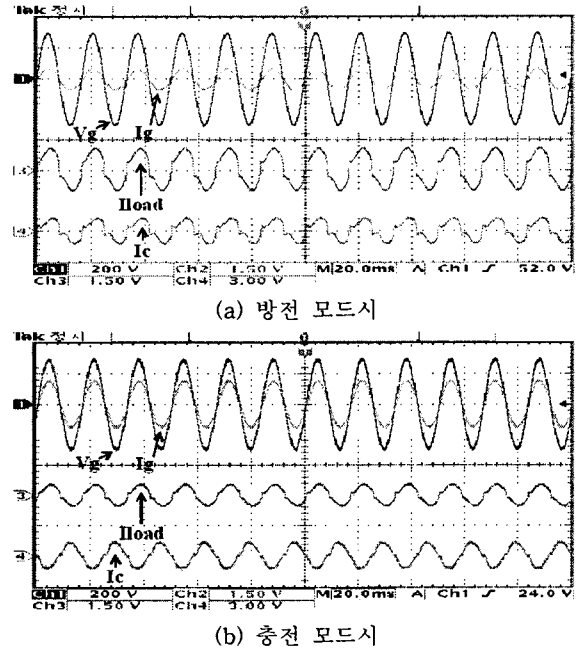


그림 14 비선형 부하시 DSM 동작파형
Fig. 14 Operation waveforms of the DSM at non-linear load

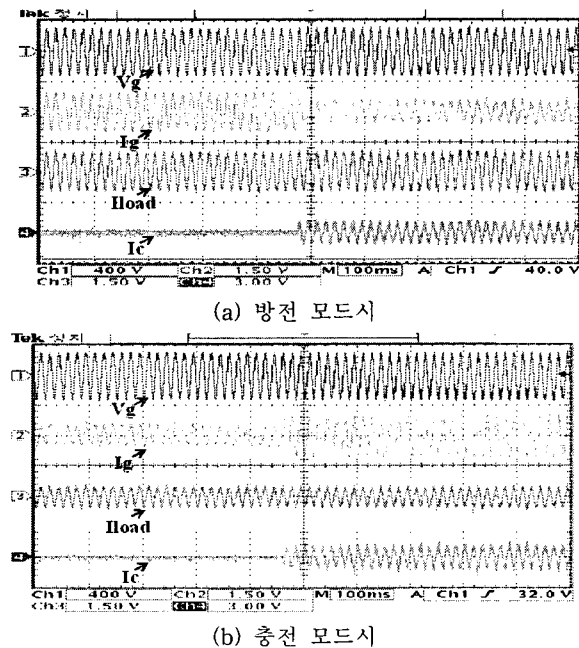


그림 15 시스템 제어 응답
Fig. 15 Control response of the system

이상, 시뮬레이션과 실험 결과를 종합하면 제안된 시스템은 인버터의 전류의 크기 및 위상을 제어함으로써 IEEE의 배전계통의 전류 기준을 만족하도록 PCS 기능을 수행하면

서 전력을 공급 또는 저장 할 수 있는 DSM 기능도 동시에 수행할 수 있음을 알 수 있다. 따라서, 제안된 시스템을 가정용으로 설치할 경우[전국 전력 계약 가구수(1천6백만)의 63[%]가 사용했다고 가정했을 때], 계통의 품질 개선을 통하여 약 10[%]정도의 공급전력(역률 0.9인 경우)의 감소가 가능할 뿐 아니라 평균전력 대비 약 28[%]이상을 초과하는 첨두 부하를 15[%]까지 감소가 가능한 매우 경제성이 있는 시스템으로 생각된다.

4. 결 론

본 논문에서는 계통 전원의 품질 향상 및 최대전력을 감소시키는 방안으로 배터리를 이용한 계통 연계형 소규모 에너지 저장 시스템을 제안하였고, PCS 기능을 수행하면서 전력을 공급 또는 저장할 수 있는 제어 알고리즘을 이론적으로 해석하고 평균전력 대비 최대전력의 소비행태에 따른 시스템 용량의 적정 설계 방법에 대하여 논의하였다. 또한, PSIM을 통한 시뮬레이션과 1[KVA]급 시작품을 제작하여 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 제안된 시스템은 PCS 제어를 통해 비선형 부하 조건에서도 계통 역률을 항상 0.99이상을 유지할 수 있고, THD를 4.2[%]이내로 제어가 가능하여 IEEE 배전 계통의 전력품질기준을 만족한다.
2. 제안된 시스템은 배터리를 이용하여 낮은 부하 일 때 약 1[KWH]를 저장하고, 이 에너지를 통하여 첨두부하시에 전력을 공급하여 최대전력을 감소시킬 수 있다.
3. 제안된 시스템은 부하의 무효전력과 첨두 부하시의 분담전력만을 담당하기 때문에 저렴한 가격으로 전력 품질 개선 및 발전설비용량을 감소시키는 효과를 기대 할 수 있다.

이상의 결과로 본 연구에서 제안한 시스템이 계통의 품질 향상 및 전체 발전설비용량 감소에 유용함을 확인하였다. 또한, 제안된 시스템은 소규모로 밀집도가 높으면서 전력사용량이 많은 도심지역에서의 사용에 유리하며 대체 에너지 시스템이 정착되기 전까지 우리나라의 에너지 수급 문제를 개선하는데 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 산업자원부의 전력사업고급인력 해외연수지원에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- [1] 경영평가팀, "2003년~2004년 전력통계속보" 한국전력공사, 2003-2004년.
- [2] 수요예측팀, "2004년도 가전기기 보급률 및 가정용 전력 소비행태 조사", 한국전력거래소, 2004년 12월.
- [3] IEEE Std 1159-1995, "IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality", IEEE standards board, June, 1995.

- [4] 이성룡, 고성훈, 김성우 "ZVT 스위칭되는 새로운 전류 제어형 인버터" 전력전자학회 논문지 Vol.7 No.2 pp. 129-136, 2002년 4월
- [5] S.R. Lee, S.H. Ko and S.S. Kim; "A Development of the Power Conditioning Technique for Grid-Connective PV Power Systems", ICCAS2002, pp. 981-985, October, 2002.
- [6] A. Papoulis, Probability, Random Variables, and Stochastic Processes, 3rd Edition, New York: McGraw-Hill, 1991.
- [7] L. J. Borle, M.S. Michael and C. V. Nayar, "Development and Testing of a 20-kW Grid Interactive Photo voltaic Power Conditioning System in Western Australia", IEEE Trans, Industry Applications, vol. 33. no. 2. pp. 502-508, March,

저 자 소 개



고 성 훈 (高 晟 勳)

1972년 6월 1일생. 1998년 군산대 제어계측공학과 졸업(학사). 2000년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 2000년~2001년 (주)서영전자 연구개발실 근무. 2004년~현재 호주 Curtin University of Technology. visiting research fellow. 2001년~현재 동 대학원 전자정보공학부 박사과정.
E-mail : merchin@kunsan.ac.kr



신 영 찬 (辛 泳 燦)

1977년 11월 20일생. 2003년 군산대 전자정보공학부 졸업(학사). 2003년~현재 동 대학원 전자정보공학부 석사과정.



이 성 룡 (李 星 龍)

1958년 11월 30일생. 1980년 명지대 전기공학과 졸업(학사). 1982년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988년 전북대 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1997년~1998년 Virginia Tech. visiting professor. 2003년~현재 호주 Curtin University of Technology. visiting professor. 1990년~현재 군산대 전자정보공학부 정교수.
E-mail : srllee@kunsan.ac.kr