

전기자동차 완속충전기용 스마트 분전반 및 그 제어방법

김명수¹, 홍순찬[†]

Smart Panel Board for EV Standard Chargers and Its Control Method

Myeong-Soo Kim¹ and Soon-Chan Hong[†]

Abstract

This study proposes an electric vehicle (EV) smart panel board and its control method on the basis of charging scheduling. The proposed system consists of batteries, a three-phase battery charger, three single-phase inverters, transfer switches for electric power distribution, and a controller. The three-phase battery charger usually charges the batteries at midnight when electric rates are cheap and in light load. When the electric power consumption of the EV standard chargers connected to one phase of the power line is relatively large or when a blackout occurs, the electric power stored in the battery is supplied by discharging through the inverters to the EV standard chargers. As a result, the value of peak load and the charging electric power quantity supplied from a utility grid are reduced, and the current unbalance is improved. The usefulness of the proposed system is confirmed through simulations, experiments, and case studies.

Key words: EVs(electric vehicles), Charger, Inverter, Charging scheduling control, Current unbalance

1. 서 론

교토의정서에 의해 국가별 이산화탄소 감산이 의무화되고, 최근 전기자동차(Electric Vehicles : EVs)에 대한 소비자의 요구가 증대되고 있어 향후에는 기존의 휘발유 차량이 친환경 교통수단인 전기자동차로의 교체가 예상된다. 전기자동차 보급이 활성화되면 휘발유 차량에서 배출되는 이산화탄소의 감소가 가능하다^[1].

서울특별시 환경영향평가 조례 제29조 제2항에 의한 “건축물 및 정비 사업의 환경영향평가 항목 및 심의 기준”^[2]에서 전기자동차의 도입 계획 수립 및 총 주차구획의 5[%] 이상 주차구획별 전력인입(충전시설, 15[A] 이상) 계획을 수립하도록 규정하고 있다. 이에 따라 건설사에서는 일부 사업 지구에 대하여 충전기를 설치하고 있다.

공동주택에 주로 설치되는 완속충전기는 일반적으로 배터리를 충전하는데 1시간 이상 소요되므로 늦게 도착한 전기자동차는 충전을 할 수 없게 되는 문제가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 최근에는 하나의 충전기로 여러 대의 전기자동차를 동시에 충전할 수 있도록 2채널 또는 다채널 완속충전기가 보급되고 있다.

이로 인해 전기자동차 충전전력 요금^[3]이 계절별, 시간대별로 2~4배의 차이가 있음에도 불구하고 특정 시간대에 동시 충전으로 인해 충전부하가 집중되면 완속충전기의 장시간 충전 특성으로 인하여 공동주택의 피크부하 시간대^[4]와 중첩되면서 변압기에 과부하가 걸려 정전 등 심각한 문제가 발생할 수 있다.

기존의 전기자동차 충전기용 분전반은 일반적으로 그림 1과 같이 전기자동차 충전전력 요금을 적용받기 위한 별도의 계량기를 통해 평상시에는 변압기에서 전력을 공급받고 정전 시에는 비상발전기로부터 전력을 공급받고 있다. 여기에서 분기 접속되는 완속충전기는 설비불평형률(Load Unbalance Factor : LUF)을 고려하여 평형하게 설치된다. 설비불평형률은 각 선간에 접속되는 단상 부하 총 설비용량(VA)의 최대와 최소의 차를 총 부하설비용량(VA) 평균값으로 나눈 값의 백분율로서 내선규정에서는 3상 4선식의 경우 그 한도를 30[%] 이하로 하는 것을 원칙으로 하고 있다^{[5]-[7]}.

Paper number: TKPE-2014-19-6-5

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: schong@dku.edu, Dept. of Electronics and Electrical Engineering, Dankook University
Tel: +82-31-8005-3609 Fax: +82-31-897-3610

¹ Dept. of Electronics and Electrical Engineering, Dankook University

Manuscript received Sep. 11, 2014; accepted Oct. 7, 2014

— 본 논문은 2014년 전력전자학술대회 우수추천논문임

완속충전기는 삼상 전력을 공급받는 급속충전기와 달리 전기자동차별 배터리 잔량 비율(State of Charge : SOC)의 차이로 인한 충전 전력량과 충전시간의 차이가 존재하여 계통 전원선의 상전류가 불평형하게 흐를 수 있다. 이로 인하여 전기자동차가 증가하면 각 상의 전원에서 전류 불평형이 증가하여 변압기에서 동손과 철손이 증가한다. 이로 인해 전원설비 이용률이 감소하고 손실이 증가하여 전기요금도 증가할 뿐만 아니라 전력망의 공통 결합점(Point of Common Coupling : PCC)에 연결되어 있는 보호계전기의 오동작 등 전기 및 정보통신기에 나쁜 영향을 줄 수 있다^[8].

따라서 퇴근 이후 전기자동차의 동시 충전으로 인한 피크부하의 억제와 전원설비 각 상의 전원에서 전류 불평형을 최소화하는 방안이 필요하다.

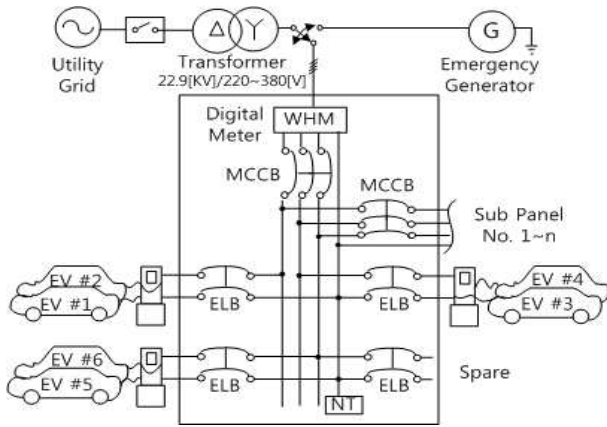


Fig. 1. Schematic diagram of an existing panel board for EV chargers.

본 논문에서는 공동주택에서 사용되는 전기자동차 충전기용 완속충전기를 대상으로 전기자동차 동시 충전으로 인한 피크부하를 억제하고 각 상의 전원에서 전류 불평형을 개선할 수 있는 충전 스케줄링 기반의 전기자동차 충전기용 스마트 분전반과 그 제어방법을 제안한다.

2. 전기자동차 충전시스템

2.1 충전시스템의 구성

충전기는 전기자동차에 탑재 여부에 따라 온보드 충전기(On-Board Charger)와 오프보드 충전기(Off-Board Charger)로 구분하며 사용 목적에 따라 홈(Home), 완속(Standard) 및 급속(Quick)으로 분류한다. 온보드 충전기는 전기자동차 내부에 설치되어 있어서 전원이 있는 곳이면 어디서나 충전이 가능한 장점이 있으나 충전기의 무게와 설치공간의 제약으로 전력 용량에 제한이 있다. 반면에 오프보드 충전기는 전력 용량과 설치 공간에 제한이 없다. 전력 레벨에 따른 온-오프 충전시스템의 전력흐름 및 개요도는 그림 2와 같다^[9].

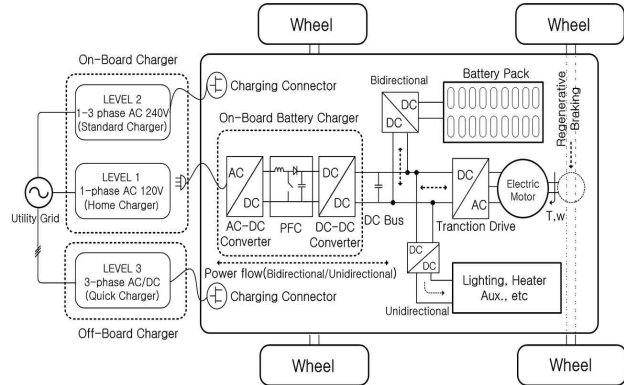


Fig. 2. On/off board charging system and power levels for EVs.

홈 충전기는 전력 레벨이 3[kW] 이하로서 주로 단독 주택에서 사용한다. 완속충전기는 입력 전압이 단상 AC 220[V]이면서 전력 레벨이 7.7[kW] 이하로서 주로 아파트나 공용주차장에 설치된다. 홈충전기나 완속충전기는 전원계통으로부터 AC 전력을 공급받아 마그네틱 스위치와 케이블을 통해 전기자동차에 탑재된 온보드 충전기에 전력을 공급하는 AC 충전 방식이며 전기자동차를 사용하지 않는 퇴근 이후 또는 충전전력 요금이 저렴한 심야에 충전한다. 반면에 급속충전기는 전력 레벨이 50[kW] 이상으로 삼상 AC 380[V]을 공급받아 AC/DC 컨버터를 통해 DC 50~500[V]를 공급하는 오프보드 충전기로서 고속도로 휴게소나 전기자동차 충전소 등에서 짧은 시간동안 부족한 전력을 보충하는 용도로 사용한다. 일반적으로 전기자동차는 완속 및 급속 충전이 모두 가능하도록 콤보 또는 두 개의 충전 소켓을 가지고 있다. 충전기의 유형 및 특징은 표 1과 같다^[10].

TABLE I
TYPES AND FEATURES OF EV CHARGERS

Item	Home	Standard	Quick
Power level	≤ 3[kW]	≤ 7.7[kW]	≥ 50[kW]
Charging time	6~8[hour]	4~6[hour]	0.2~0.5[hour]
Purpose of use	General	Consumption	Supplement
Hours of use	Midnight	Get off work or parking	Emergency
Location	Home garage	Apartment, Public park	Electric charging station, Rest area

완속충전기는 사용자 인식 및 충전요금 결제를 위한 디지털 계량기, 충전기와 통신을 통해 충전기 운영정보 및 충전 전력량을 사용자에게 공지하는 충전기 운영정보시스템과 연결된다. 공동주택에서의 전기자동차용 완속 충전시스템은 그림 3과 같다.

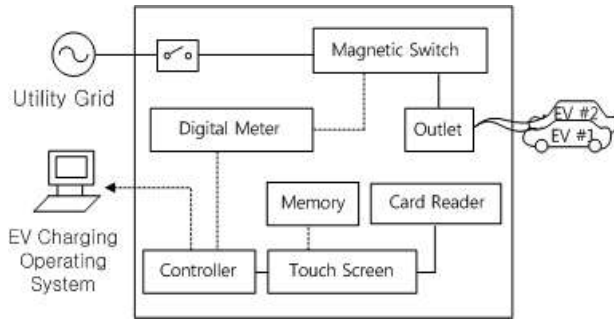


Fig. 3. Block diagram of an EV charging system(Standard charger).

2.2 전기자동차 전력소비특성

충전기의 전력소비특성은 전원설비의 최대수요전력을 결정하는 중요한 요소이다. 충전기에 대한 전력소비특성 분석 자료^[11]에 의하면 완속충전기의 경우 시간대별 1회당 평균 충전 전력량이 3.71~12.72[kWh] 범위에 있으며 충전 전력량의 변동률은 70.8[%]로 매우 크다. 이에 비해 급속의 경우 시간대별 1회당 평균 충전 전력량이 7.21~9.42[kWh] 범위 내에 있고 충전 전력량의 변동률은 23.5[%]로 완속에 비해 낮고 균등하다. 시간대별 1회당 평균 충전 전력량의 변동률은 충전 전력량의 최대와 최소와의 차이 값을 최대값으로 나눈 값의 백분율이다.

1회당 평균 충전시간은 1회 평균 충전 전력량 7.8[kWh]을 완속충전기의 정격용량이 7~7.7[kW]임을 고려한 7[kW]로 나눈 값으로서 약 70분 정도 소요된다. 급속의 경우에는 1회 평균 충전 전력량 8.68[kWh]을 정격용량 50[kW]로 나눈 값으로 약 10분 정도 소요된다. 전기자동차 연비가 6.5[km/kWh]라고 하면 하루 평균 약 50~56[km]을 주행하며 완전 방전 후 일시에 완전 충전을 하기보다는 매일 재충전하는 충전패턴이다^{[10]-[11]}.

완속충전기의 경우 장시간 동안 충전하는 특성이 있으므로 사전에 충전부하의 예측과 재분배가 가능하면 전기자동차의 동시 충전으로 인한 피크부하의 억제와 전류불평형의 개선이 가능하다.

3. 충전 스케줄링 기반의 스마트 분전반

3.1 제안한 충전 스케줄링 알고리즘

공동주택의 경우 대부분 차량이 퇴근 이후에 귀가하여 충전한다. 하지만 이 시간대는 공동주택에서 전력수요가 가장 높은 시간대이며, 충전전력 요금 기준에서도 중간부하와 최대부하 시간대에 해당한다. 따라서 될 수 있으면 전력수요가 가장 높은 피크부하 시간대를 피하여 최소한의 충전기와 충전전력 요금으로 사용자의 요구를 최적화하여 충전 전력량(Charging electric power quantity : CEPQ)을 제어할 필요가 있다.

본 논문에서 제안한 충전 스케줄링 제어알고리즘은 정해진 변압기 용량 범위 내에서 되도록이면 전력수요

가 가장 높은 피크부하 시간대를 피하여 최소한의 충전기와 충전요금으로 사용자의 요구를 최적화하고 변압기에 과부하가 걸리지 않게 충전 전력량을 제어하는 것이다. 즉, 충전 대기 중인 사용자가 충전정보를 입력하고 사용자 인증을 거쳐 충전 커넥터를 완속충전기에 연결하면 충전 대상 리스트에 항목을 추가하고 충전 요구 전력량이 큰 순서대로 우선순위를 설정하여 전력을 공급한다. 해당 전기자동차의 충전이 완료되면 전력 공급이 중단되고 충전이 종료된다.

만약, 충전 중에 다른 차량이 충전하기 위해 충전 커넥터가 연결되면 그 시점에서 해당 전기자동차를 충전 대상 리스트에 추가하고 충전 스케줄링 제어알고리즘을 통해 충전 요구 전력량을 재산정하며 우선순위에 따라 해당 채널에 전력을 공급한다. 완속충전기별 충전 요구 전력량의 합은 식 (1)과 같으며 최대 충전 가능 전력량은 식 (2)와 같다.

$$W_{cds} = W_{cd1} + W_{cd2} \dots + W_{cdn} [kWh] \quad (1)$$

단, W_{cds} : 완속충전기별 충전요구 전력량의 합

W_{cdn} : n번째 완속충전기의 충전요구 전력량

$$W_{cpmax} = W_{util} + W_{batt} [kWh] \quad (2)$$

단, W_{cpmax} : 최대 충전 가능 전력량

W_{util} : 계통에서 공급하는 충전 전력량의 합

W_{batt} : 배터리에서 공급하는 충전 전력량의 합

전체 충전 요구 전력량이 최대 충전 가능 전력량보다 클 경우 식 (3)과 같이 충전요구 전력량의 합에 대한 완속충전기별 충전 요구 전력량의 비에 최대 충전 가능 전력량을 곱해서 해당 완속충전기별 실제 충전 전력량을 재계산한다.

$$W_{cpn} = (W_{cdn} / W_{cds}) \times W_{cpmax} [kWh] \quad (3)$$

W_{cpn} 은 n번째 완속충전기에 설치된 계량기에서 측정된 전력량이다. W_{cps} 는 식 (4)와 같이 전기자동차 충전 전력 요금을 적용받기 위해 설치한 메인 계량기에서 측정된 전력량을 의미한다. 식 (5) 및 식 (6)에 의해 계통과 배터리에서 공급하는 충전 전력량을 구할 수 있다.

$$W_{cps} = W_{cp1} + W_{cp2} \dots + W_{cpn} [kWh] \quad (4)$$

$$W_{cps(util)} = (W_{util} / W_{cpmax}) \times W_{cps} [kWh] \quad (5)$$

$$W_{cps(batt)} = (W_{batt} / W_{cpmax}) \times W_{cps} [kWh] \quad (6)$$

피크부하 시간대에 충전 스케줄링 제어알고리즘에 의해 충전부하가 분산되면 적은 비용으로 최적의 충전이 가능하고 배터리에서 공급하는 전력량만큼 계통에서 공

급하는 전력량이 감소하여 피크부하의 억제가 가능하다. 충전 스케줄링 제어알고리즘은 그림 4와 같다.

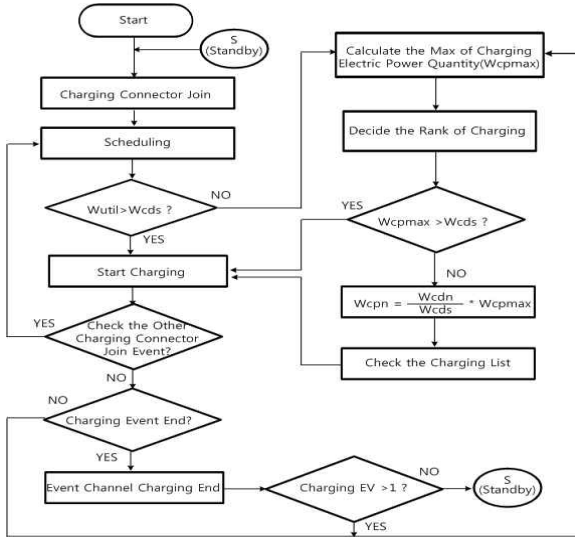


Fig. 4. Charging scheduling control algorithm.

3.2 제안한 시스템의 구성 및 특징

본 논문에서 제안한 충전 스케줄링 기반의 전기자동차 충전기용 스마트 분전반의 회로도 는 그림 5와 같다. 기존의 공동주택에 신규로 전기자동차 충전시스템을 설치하기 위해서는 전원설비에서 충전기까지 별도의 배관 및 배선의 설치가 필요하고 기존 전원설비의 용량 증설 및 교체 등 공사가 어려운 문제가 있다.

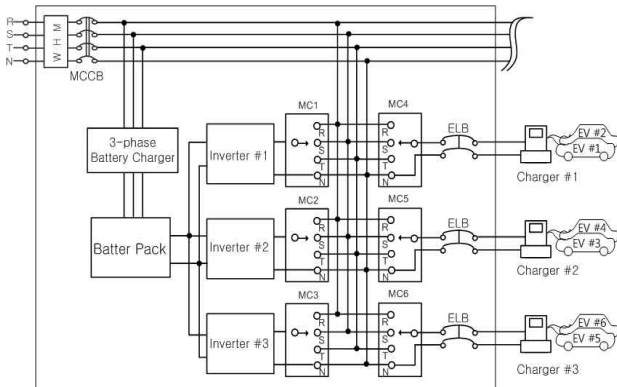


Fig. 5. Schematic diagram of the proposed system.

한편, 기존 공동주택에 설치된 태양광발전설비의 경우 에너지 저장장치가 없고 주간 시간대에 발전된 유휴전력이 단상 인버터를 통해 계통으로 역전송되어 전기에너지의 이용측면에서 비효율적인 단점이 있다. 하지만 제안한 시스템은 주간 시간대에 태양광발전설비가 발전한 유휴전력을 배터리에 저장하였다가 충전부하가 집중되는 저녁 최대부하 시간대에 활용하므로 전기에너지의 효율적 이용이 가능하다.

또한, 완속충전기에 비상전력을 공급하기 위한 비상발전기까지의 배관과 배선의 설치가 불필요할 뿐만 아니라 비상발전기와 전원설비의 설치용량이 감소되어 전원설비 이용률의 개선이 가능하다. 궁극적으로 충전 스케줄링 제어알고리즘과 제안한 시스템을 통해 피크부하 시간대를 피하여 전기자동차를 충전하게 되면 국가 차원에서 발전소의 예비전력을 증가시키지 않으므로 추가적인 발전소의 건설 없이 전기자동차의 충전이 가능해져 발전소 건설비용이 절감된다.

본 논문에서 제안한 시스템은 충전 스케줄링 기반으로 피크부하를 억제하고 인버터와 절체스위치를 통한 단상 충전부하에 의한 각 상 전원선에서의 전류불평형을 효율적으로 개선하는 기능을 갖는 점에서 가장 큰 특징이 있다. 제안한 시스템의 특징은 표 2와 같다.

TABLE II
PROPERTY OF THE PROPOSED SYSTEM

Item		Present	Proposed
Power source	In normal state	Grid	Grid/Battery
	Emergency	Generator	Battery
Capacity of transformer & emergency generator		Increase	Decrease
Constructability		Complex	Simple
Application to the existing apartments		Impossible	Possible
Reliability		Good	Best
Response time		Good	Best
Peak load control		Impossible	Possible
Energy saving		Impossible	Possible

3.3 시스템 동작 및 제어방법

제안한 시스템의 동작은 정상시, 피크부하 시, 부하 불평형 시와 정전 시로 구분된다. 충전 및 방전 제어도와 제어 시퀀스는 그림 6 및 그림 7과 같다.

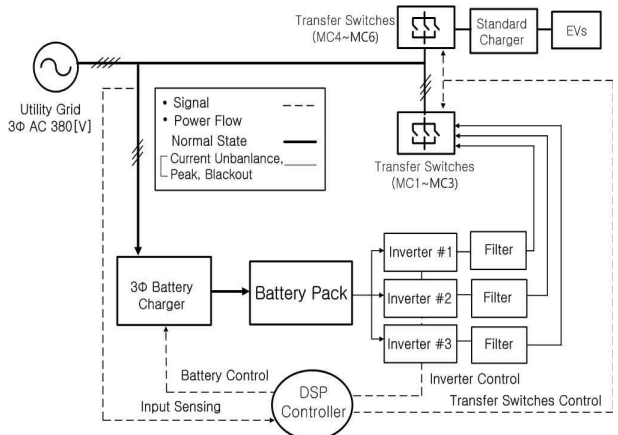


Fig. 6. Control diagram of the proposed system.

충전 및 방전 동작 설명을 위한 초기조건으로 인버터는 꺼진 상태이며, 각 상의 전원선에서 MC4~MC6를 통해 완속충전기에 전력을 공급하고 있는 상태로 가정한다. R상의 부하를 L_R , S상의 부하를 L_S , T상의 부하를 L_T 로 정의한다. 제어기는 제안한 시스템 내의 배터리 SOC를 확인하여 충전 및 방전 동작과 절체스위치를 제어한다. 그림 4의 충전 스케줄링 제어알고리즘으로부터 예측한 배터리 충전 및 방전동작을 하는 전력 제어알고리즘은 그림 8과 같다.

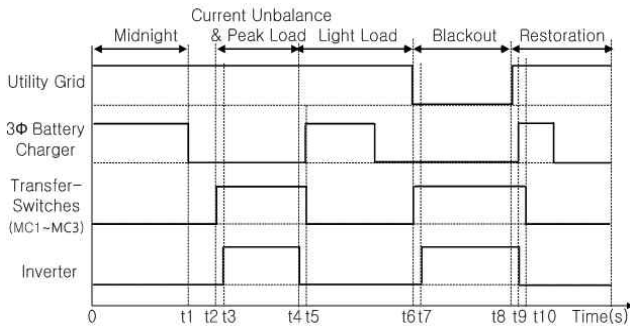


Fig. 7. Control sequence of the proposed system.

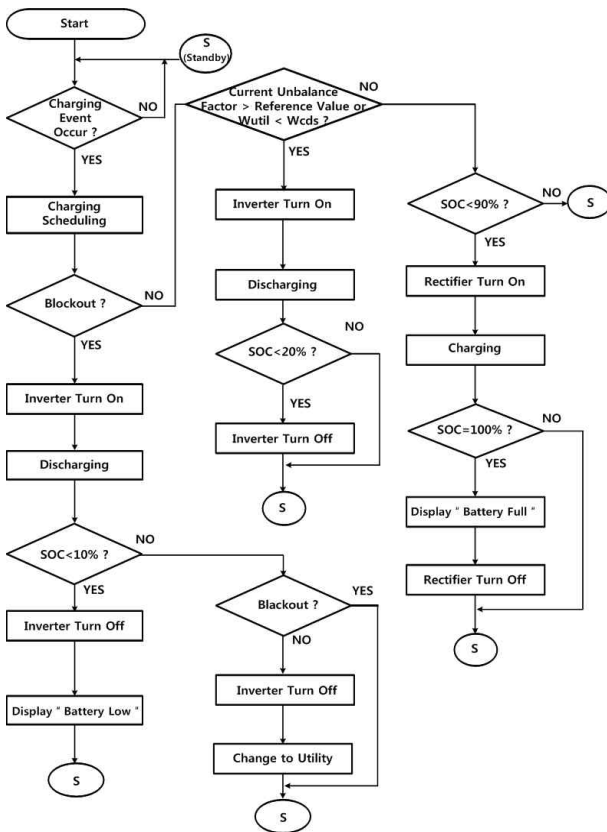


Fig. 8. Control algorithm of the proposed system.

경우별 동작은 다음과 같다.

3.3.1 정상 시

정상시 심야 또는 경부하시간대에 SOC가 90[%]보다 작을 경우, 3상 충전기는 시스템 내의 배터리를 충전한다. 배터리의 SOC가 100[%]가 되면 충전기를 턴오프하고 충전동작이 정지한다.

3.3.2 피크부하 시(부하 평형 시)

각 상에 연결된 충전부하가 평형상태이고 피크부하 시간대에 충전 스케줄링 제어알고리즘으로부터 변압기의 과부하가 예측되면 그림 7의 t2에서 그림 5의 MC1~MC3를 해당 전원선에 연결한다. 이어서 t3에서 인버터를 턴온하여 배터리에서 전력을 공급하여 피크부하를 억제한다. 전력이 공급됨에 따라 배터리의 SOC 값이 감소하여 20[%] 미만이 될 경우 정전 시의 비상전력을 확보하기 위하여 절체스위치가 꺼지고 인버터가 턴오프되어 동작을 중지한다.

3.3.3 부하 불평형 시

부하가 불평형인 경우를 정리하면 표 3과 같다. 표 3의 Case 1은 R상의 충전부하가 S상 보다 크고 S상의 부하가 T상 부하보다 커서 부하가 불평형인 경우로서 MC1과 MC2를 R상에 연결하여 인버터 #1과 인버터 #2의 출력을 R상의 전원선에 전력을 공급한다. MC3는 S상에 연결하여 인버터 #3를 통해 배터리에서 전력을 공급한다. 이와 마찬가지로 Case 2는 Case 1과는 달리 T상 부하가 S상 부하보다 큰 경우로서 MC1과 MC2는 그대로 R상에 연결하지만 MC3는 T상에 연결하여 전력을 공급한다.

TABLE III
TRANSFER SWITCHES(MC1~MC3) OPERATION

Item	Load condition	MC1	MC2	MC3
Case 1	$L_R > L_S > L_T$	R_{ON}	R_{ON}	S_{ON}
Case 2	$L_R > L_T > L_S$	R_{ON}	R_{ON}	T_{ON}
Case 3	$L_R \gg L_S, L_T$	R_{ON}	R_{ON}	R_{ON}
Case 4	$L_S > L_R > L_T$	S_{ON}	S_{ON}	R_{ON}
Case 5	$L_S > L_T > L_R$	S_{ON}	S_{ON}	T_{ON}
Case 6	$L_S \gg L_R, L_T$	S_{ON}	S_{ON}	S_{ON}
Case 7	$L_T > L_R > L_S$	T_{ON}	T_{ON}	R_{ON}
Case 8	$L_T > L_S > L_R$	T_{ON}	T_{ON}	S_{ON}
Case 9	$L_T \gg L_R, L_S$	T_{ON}	T_{ON}	T_{ON}

Case 3의 경우는 R상의 부하가 S상이나 T상보다 매우 큰 경우로서 MC1~MC3를 모두 R상에 연결하여 인버터 #1~인버터 #3가 동시에 R상에 전력을 공급한다. Case 4~9의 경우에도 인버터와 MC1~MC3를 선택적으로 제어하여 배터리에서 전력을 공급하면 각 상의 전원선에서의 불평형이 완화되면서 계통에서 공급하는 전

력을 감소시킬 수 있다.

3.3.4 정전 시

정전 시에는 t6에서 MC1, MC2와 MC3를 각 상의 전원선에 연결한다. 이어서 t7에서부터 인버터 #1, 인버터 #2와 인버터 #3를 턴온하여 정전된 동안 완속충전기에 비상전력을 공급한다. 상용전원이 회복되지 않더라도 SOC가 10[%] 미만으로 낮아지면 시스템의 원활한 동작과 배터리의 보호를 위하여 절체스위치를 차단한다.

3.3.5 상용전원 회복 시

상용전원이 회복된 t8부터 일정 시간이 지난 후 인버터 동작을 정지시킨다. 이어서 MC1~MC3가 꺼지고 대기상태로 전환된다.

3.3.6 충전부하의 재분배

전기자동차의 사용자가 불규칙적으로 충전을 하므로 각 상의 전원선에서 전류불평형이 발생할 수 있다. 이때 전기자동차 충전기용 메인 분전반 앞단에서의 전력 모니터링 기능과 충전 스케줄링 제어알고리즘으로부터 MC4~MC6를 통해 각 상에 선택적으로 충전부하를 연결하면 충전기용 분전반에 전원을 공급하는 모션 측에서 전류가 보다 더 평형하게 된다.

표 3의 부하 불평형 시와 다르게 배터리를 사용하지 않으면서 전류불평형 문제를 해결할 수 있을 뿐만 아니라 배터리 설치용량이 감소하고 효율적 이용이 가능한 이점이 있다.

4. 회로 구성 및 시뮬레이션

본 논문에서 제안한 시스템은 그림 5와 같다. 충전회로는 교류 3상 380[V]를 사용하며, 3대의 단상 인버터가 동작하지 않을 때 심야시간이나 경부하일 때 배터리를 충전한다. 인버터는 2채널 완속충전기의 용량을 고려하여 3대의 단상 인버터 용량을 각각 5[kW]급으로 구성하여 최대 15[kW]를 공급하도록 한다. 정전 시 비상전력을 공급하기 위하여 5[kW]의 여유를 두어 배터리팩의 용량은 20[kWh]급으로 한다.

배터리팩은 3.6[V]/40[Ah]인 셀 14개를 직렬로 연결한 트레이 2개를 병렬로 연결하여 모듈을 만들고 이 모듈 5개를 직렬로 연결하여 20[kWh]의 랙(Rack)을 구성한다. 셀의 동작전압이 3.1~4.1[V]이므로 모듈 전압은 43.4~57.4[V]이며 배터리팩의 전압은 217~287[V]이다.

방전회로는 그림 9와 같이 전 브리지 컨버터와 변압기, 3개의 반 브리지 인버터와 필터로 구성된다. 일반적으로 인버터의 입력단 전압이 311[V]이상이면 교류 220[V]로 변환할 수 있지만 실제 회로 구현 시 소자에서의 손실 및 변환효율을 감안하여 여유 있게 380[V]로 설정하고 전 브리지 컨버터의 출력전압은 760[V]로 제

어한다. 반 브리지 인버터 입력단의 커패시터 C3와 C4에 각각 380[V]의 전압이 인가되며, 3대의 단상 인버터는 입력단의 DC 760[V]를 AC 220[V]으로 변환하고 각 상의 전원선에 전력을 공급한다.

본 논문에서는 각 상의 전원선에서 피크부하 억제와 전류 불평형의 개선효과를 확인하기 위해 부하 평형시와 부하 불평형시로 구분하고 PSIM을 사용하여 시뮬레이션을 수행한다. 시뮬레이션에 사용한 파라미터 값은 표 4와 같다.

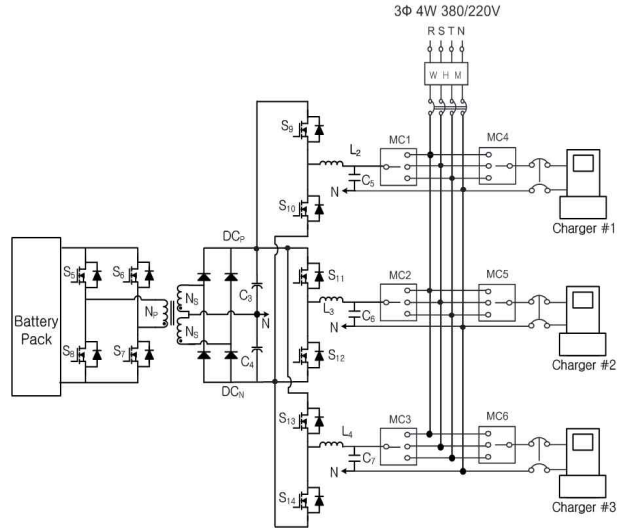


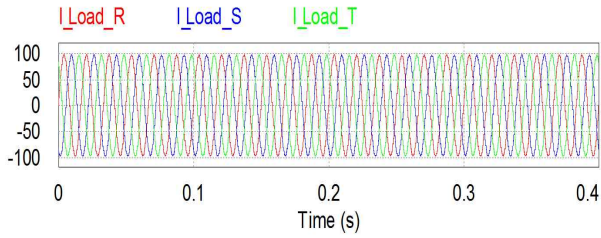
Fig. 9. Discharging circuit.

TABLE IV
PARAMETERS OF THE DISCHARGING CIRCUIT

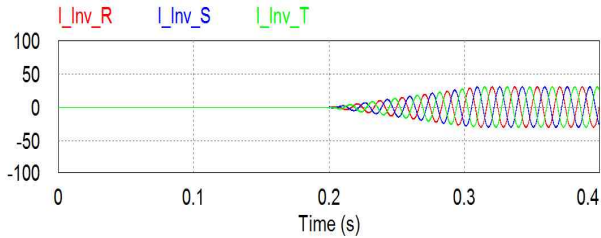
Parameters	Value
Output power	AC 220 [V], 60 [Hz]
Switching frequency	19.2 [kHz]
Np : Ns	1 : 2
C3, C4	1,360 [uF]
L2, L3, L4	1.5 [mH]
C5, C6, C7	1 [uF]

4.1 부하 평형 시

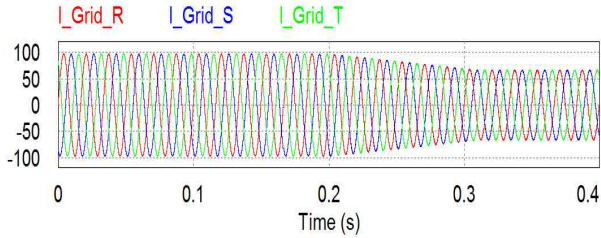
피크부하 시간대에는 인버터를 동작시켜 전원에서 공급되는 전력을 감소시켜야 한다. 각 상의 충전부하가 동일하면 그림 10(a)와 같이 각 상 전원선에서 공급하는 세 부하전류가 평형하게 흐른다. 피크부하를 억제하기 위해 0.2초 시점에서 인버터를 턴온하면 배터리에서 충전부하에 공급하는 인버터의 출력전류는 그림 10(b)와 같다. 이 경우 배터리에서 전력을 공급함에 따라 계통으로부터 부하에 공급하는 전류가 그림 10(c)와 같이 감소한다.



(a) Line currents of Loads



(b) Output current of inverters



(c) Phase currents of grid

Fig. 10. Current waveforms in case of balanced loads.

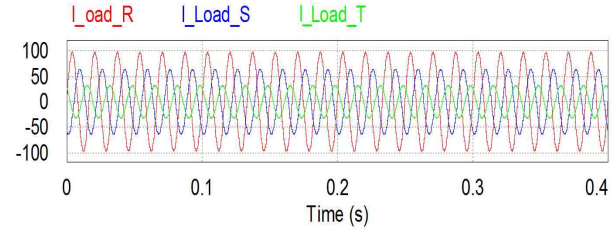
4.2 부하 불평형 시

전기자동차의 충전 전력량의 차이로 인하여 각 상에 연결된 충전부하가 불평형하게 되면 각 상의 전원선에 흐르는 부하전류가 불평형이 된다.

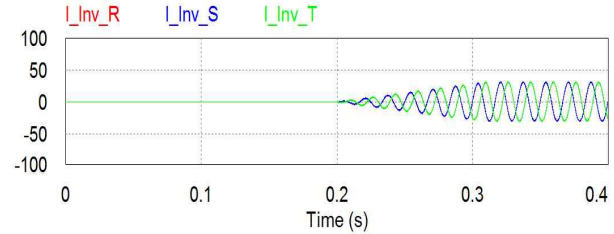
예를 들어 R, S, T상의 부하가 각각 15[kW], 10[kW], 5[kW]로 불평형일 때 각 상의 계통 전원선에 흐르는 부하전류의 파형은 그림 11(a)와 같이 불평형하게 흐르게 된다. 이러한 전류불평형을 개선하기 위해 그림 9의 MC1과 MC2를 R상의 전원선에 연결하고 인버터 #1과 인버터 #2를 R상과 동상으로 동작시켜 배터리에서 10[kW]의 전력을 공급한다. 동시에 MC3를 S상의 전원선에 연결하고 인버터 #3을 동작시켜 S상에 5[kW]의 전력을 공급한다.

이렇게 하면 R상의 전원선에 흐르는 전류와 S상에 흐르는 전류가 감소하여 T상에 흐르는 전류의 크기와 같게 된다. 인버터의 출력전류 파형은 그림 11(b)와 같은데 인버터 #1과 인버터 #2의 출력파형이 동일하여 겹쳐져서 하나의 파형으로 보이고 인버터 #3의 출력파형이 하나로 보여서 전체 2개의 파형인 것처럼 보인다. 이와 같이 인버터가 동작하면 R상과 S상의 전원선에서 흐르는 전류가 감소하며, 그림 11(c)와 같이 크기가 거의 같게 된다.

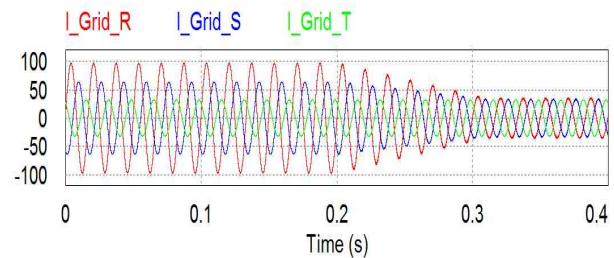
본 논문에서 제안한 시스템의 유용성을 확인하기 위해 이론적으로 설계한 인버터 용량의 1/20에 해당되는 250W급 단상 인버터 3대를 사용하여 간이 실험세트를 구성하였다. 실험의 편의를 위하여 리튬 배터리 대신 DC 전원장치를 사용하였으며 전기자동차 충전부하 대신에 저항부하를 사용하여 실험을 시행하였다. 실험에 사용한 파라미터는 표 5와 같다.



(a) Line currents before inverter operation



(b) Output currents of inverters



(c) Phase currents of grid

Fig. 11. Waveforms of currents in case of unbalanced loads.

TABLE V
PARAMETERS OF EXPERIMENT EQUIPMENT

Parameters	Value
AC Input voltage	3Φ 4W, AC 220[V]
DC Power supply input voltage	DC 34[V]
Inverter output power	250[W]
Transfer switch rated voltage(current)	Magnetic switch 1Φ, AC 220[V](30A)

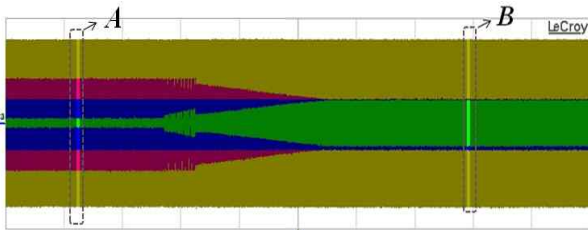
5. 실험결과

5.1 인버터에 의한 불평형 보상

R상에 500[W], S상과 T상에 각각 250[W] 용량의 부하가 걸린 부하 불평형 상태를 예로 하여 인버터 동작에 의해 각 상 전원선에서의 전류불평형이 개선되는 것을 입증하기 위해 실험하였다.

그림 12는 5[s] 시점에서 인버터를 턴온하여 R상에 전력을 공급하는 경우의 실험결과로서 R상의 전압 및 전류, S상의 전류와 인버터의 R상 전류를 측정된 실험파형이다. 여기서 S상과 T상의 부하량이 같고 전류 프로브(Probe)가 3개뿐이어서 T상의 전류파형은 나타나지 않았다. 그림 12의 A부분은 인버터가 동작하기 이전이며, R상 전원선에 흐르는 전류와 S상의 전류가 차이가 있어 전원선에서 전류불평형이 발생한다.

그림 12의 B부분은 R상의 전원선에 인버터가 연결되어 250[W]를 공급하는 상태로서 인버터가 전력을 공급함에 따라 R상의 전원선에서 공급하는 전류가 감소하여 S상의 전원선에서 공급하는 전류와 동등한 크기를 갖게 된다.



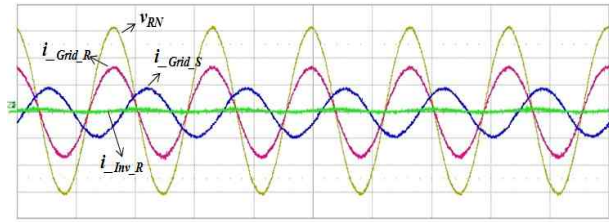
Horizontal : 2[s]/div.
Vertical : 100[V]/div., 2[A]/div.

Fig. 12. Phase voltage and line currents of grid and output current of inverter in case of unbalanced loads.

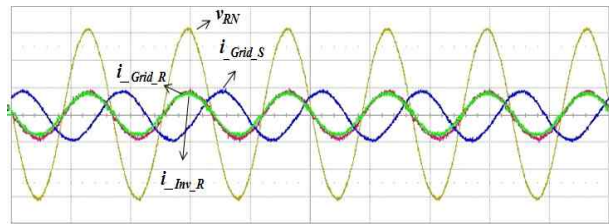
그림 13은 그림 12에서 인버터가 동작하기 전과 후의 파형을 확대한 그림이다. 그림 13(a)는 그림 12의 A부분을 확대한 파형으로서 인버터가 동작하기 전의 R상 상 전압 V_{RN} , R상 선전류 $i_{Grid,R}$, S상 선전류 $i_{Grid,S}$ 및 R상 인버터 출력전류 $i_{Inv,R}$ 의 파형이다. R상의 부하량이 S상의 부하량보다 크므로 $i_{Grid,R}$ 의 크기가 $i_{Grid,S}$ 의 크기보다 크다. 인버터가 전력을 공급하지 않으므로 $i_{Inv,R}$ 의 값은 0이다. 그림 13(b)는 인버터가 동작한 이후인 그림 12의 B부분을 확대한 파형이다. 인버터에서 전력을 공급함에 따라서 $i_{Grid,R}$ 의 크기가 점차로 감소하여 $i_{Grid,S}$ 의 크기와 유사하게 되어 전류 불평형이 개선되었음을 알 수 있는데, 그림에서 $i_{Grid,R}$ 과 $i_{Inv,R}$ 의 파형이 겹쳐져 보인다.

이와 마찬가지로 각 상에 연결된 다양한 부하 조건에서 인버터와 절체스위치(MC1~MC3)를 통해 각 상에 선택적으로 전력을 공급하면 계통 전원선에서 전류 불

평형의 개선이 가능한 결과를 얻었다.



(a) Waveforms of voltage and currents before inverter operation



(b) Waveforms of voltage and currents after inverter operation

Horizontal : 10[ms]/div.
Vertical : 100[V]/div., 2[A]/div.

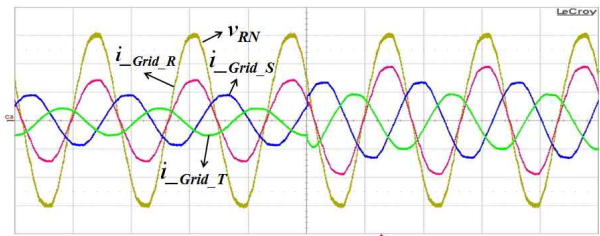
Fig. 13. Unbalance compensation by inverter operation.

5.2 충전부하 재분배에 의한 불평형 보상

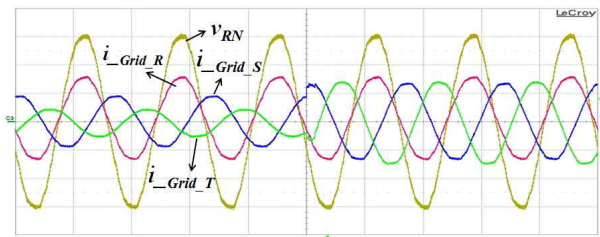
공동주택 단지의 경우 전기자동차 충전기용 메인 분전반(Main Panel)을 통해 다수 대의 서브분전반(Sub Panel)과 완속충전기가 분기되고 여기에 전기자동차의 충전부하가 연결된다. 이 경우 전기자동차별 충전 전류량과 충전시간의 차이로 인하여 전원선에 불평형이 발생할 수 있다. 이와 같이 전원선이 불평형한 상태에서 부하가 추가되었을 때 충전부하를 재분배하여 불평형이 보상됨을 확인하기 위해 실험을 시행하였다.

그림 14(a)는 R상에 1.05[kW], S상에 0.7[kW], T상에 0.35[kW]의 부하가 걸려 있는 상태에서 각 상에 0.35[kW]의 충전부하가 추가되었을 경우의 실험결과이다. 실험파형으로부터 충전부하를 재분배하지 않음으로 인하여 충전부하가 추가된 이후에도 전원선 전류가 그대로 불평형임을 알 수 있다. 이때 본 논문에서 제안한 충전 스케줄링 제어알고리즘을 적용하여 추가된 0.35[kW]인 세 충전부하를 하나는 S상에 접속하고 나머지 둘은 T상에 접속하면 불평형이 보상될 수 있다. 그림 14(b)는 MC4~MC6를 사용하여 추가된 부하를 재분배한 경우의 실험결과로서 50[ms] 시점부터 불평형이 보상되었음을 알 수 있다.

그림 13과 그림 14의 실험결과로부터 인버터를 사용하거나 충전부하를 재분배하여 불평형을 개선할 수 있음을 확인하였다. 따라서 충전 스케줄링 제어알고리즘을 통하여 두 경우를 상호 유기적으로 제어하면 배터리 설치용량의 감소와 효율적 이용이 가능하다.



(a) Waveform of voltage and currents without MC4~MC6 operation



(b) Waveform of voltage and currents with MC4~MC6 operation

Horizontal : 10[ms]/div.
Vertical : 100[V]/div., 5[A]/div.

Fig. 14. Unbalance compensation by the redistribution of charging loads.

6. 사례분석 및 검토

본 논문에서 제안한 시스템의 피크부하 저감 및 전류 불평형의 개선 효과를 정량적으로 분석하기 위해 선형 계획법(Linear programming)에 의한 수리모델^[12]을 사용하여 사례분석을 수행한다.

충전 조건으로는 하나의 분전반에 연결되는 2채널 완속충전기 3대와 여기에 연결된 전기자동차 6대를 대상으로 한다. 피크부하 시간대에 전원설비 용량이 부족한 경우를 고려하여 시간대별 최대 공급가능 충전 전력량을 21[kWh]로 제한한다. 전기자동차별 배터리의 용량은 제조회사마다 약간의 차이가 있으나 본 논문에서는 30[kWh]를 예로 하여 완전 충전하는데 5시간이 소요되는 것으로 가정한다. 전기자동차별 충전 조건은 표 6과 같다.

기존의 방식대로 퇴근 이후 귀가 하는 순서에 따라 전기자동차를 7[kW]로 동시에 충전할 경우의 시간대별 충전 전력량은 표 7과 같다. 퇴근 이후 시간대별 EV의 충전 전력량은 4.5~28[kWh]으로 충전 전력량의 변동률은 최대값 대비 83.9[%]로 매우 크다. 표 7의 20시간대 및 21시간대의 경우에는 충전 전력량이 모두 28[kWh]로서 앞에서 설정한 시간대별 최대 충전 가능 전력량인 21[kWh]을 초과하여 피크부하의 원인이 된다.

TABLE VI
CHARGING INFORMATION OF EVs

EV No.	Item	Time[hour]			Initial SOC
		Start	Close	Charging	
R	EV #1	19:00	22:00	3	20[%]
	EV #2	19:00	22:00	3	30[%]
S	EV #3	20:00	23:00	3	30[%]
	EV #4	20:00	01:00	5	20[%]
T	EV #5	23:00	04:00	5	10[%]
	EV #6	24:00	05:00	5	15[%]

본 논문에서 제안한 충전 스케줄링의 단위 시간을 15분으로 하고 단위 시간당 1.5[kWh]씩 충전하면 전기자동차는 시간대별로 6[kWh]를 충전하게 된다. 이 값을 적용하여 구한 시간대별 충전 전력량은 표 8과 같다.

TABLE VII
HOURLY CHARGING ELECTRIC POWER QUANTITY BY EXISTING METHOD

Time Zone EV No.	19	20	21	22	23	24	01	02	03	04	CEPQ [kWh]
	R	EV #1	7	7	7						
R	EV #2	7	7	7							21
S	EV #3		7	7	7						21
	EV #4		7	7	7	3					24
T	EV #5				7	7	7	6			27
	EV #6					7	7	7	4.5		25.5
Total	14	28	28	14	10	14	14	13	4.5	0	139.5

TABLE VIII
HOURLY CHARGING ELECTRIC POWER QUANTITY BY CHARGING SCHEDULING

Time Zone EV No.	19	20	21	22	23	24	01	02	03	04	CEPQ [kWh]
	R	EV #1	6	6	6						
R	EV #2	6	6	6							18
S	EV #3		6	6	6						18
	EV #4		3	3	6	6	6				24
T	EV #5				6	6	6	6	3		27
	EV #6					6	6	6	6	1.5	25.5
Total	12	21	21	12	12	18	12	12	9	1.5	130.5

이와 같은 충전 스케줄링 제어알고리즘을 적용하면 20시간대와 21시간대에서 계통이 공급하는 시간대별 최대 충전 전력량이 당초 28[kWh]에서 21[kWh]로 감소하고 일부 충전부하가 심야시간대로 이동하므로 경제적 충전이 가능한 장점이 있다. 그러나 표 8에서 EV #1,

EV #2, EV #3의 충전 전력량의 합이 표 7의 21[kWh]에서 18[kWh]로 감소하고 충전 후의 SOC가 표 9와 같이 각각 80%, 90%, 90%로 완전충전을 못하는 경우가 발생한다. 뿐만 아니라 각 상별로 시간대별 충전 전력량의 합이 1.5~12[kWh]의 차이가 발생하여 각 상의 전원에서 전류불평형이 발생하는 원인이 된다. 하지만 본 논문에서 제안한 충전스케줄링 제어알고리즘과 시스템을 적용하여 표 9의 EV별 부족한 SOC에 해당하는 전력량을 배터리에서 공급하면 피크부하 값이 증가하지 않으면서 추가적으로 충전이 가능하다.

또한, 피크부하 억제효과 측면에서 표 8의 20시간대를 예로 들면 계통에서 공급하는 전력량이 28[kWh]에서 21[kWh]로 감소한다. 이때 추가적으로 배터리에 충전된 전력을 인버터를 통해 3[kWh] 만큼 방전한다면 계통에서 공급하는 전력량이 21[kWh]에서 18[kWh]로 더욱 더 낮아져서 피크부하 값이 최대값 대비 약 35.7%가 감소한다. 퇴근 이후 시간대별 피크부하 저감곡선은 그림 15와 같다.

TABLE IX
CHARGING RESULTS BY CHARGING SCHEDULING

Item EV No.	Before	After		Shortage of SOC
	SOC	SOC	CEPQ[kWh]	
EV #1	20[%]	80[%]	18	20[%]
EV #2	30[%]	90[%]	18	10[%]
EV #3	30[%]	90[%]	18	10[%]
EV #4	20[%]	100[%]	24	0[%]
EV #5	10[%]	100[%]	27	0[%]
EV #6	15[%]	100[%]	25.5	0[%]

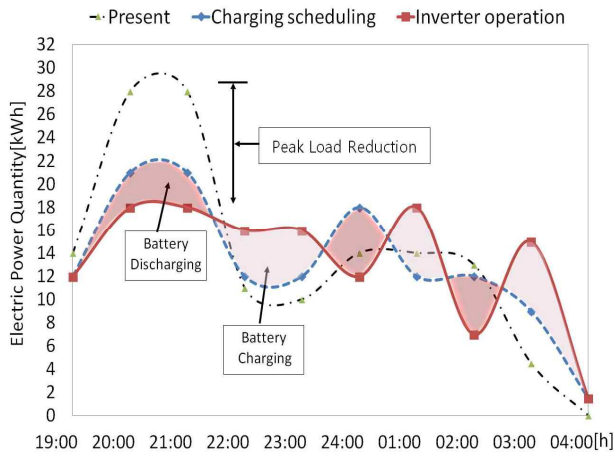


Fig. 15. Peak load reduction by charging scheduling and inverter operation.

피크부하 억제효과와는 별개로 표 8의 20시간대의 충전 전력량을 충전 스케줄링 단위 시간인 15분 간격으로 재분배하면 표 10과 같다. EV #1과 EV #2는 20:00시 부

터 15분 동안 1.5[kWh]의 충전 전력량을 R상에서 공급받고 EV #3의 1.5[kWh]와 EV #4의 0.75[kWh]는 S상에서 그대로 공급받는다. 20:15~20:30과 20:45~21:00 시간 동안에는 EV #1과 EV #2는 R상에서 공급받던 1.5[kWh]를 MC4의 조작에 의해 T상에서 공급받도록 한다.

이렇게 하면 계통에서 공급하는 전체 충전 전력량은 R상의 경우 12[kWh]에서 6[kWh]으로 감소하고 S상은 변동 없이 그대로 9[kWh]이며 T상은 0[kWh]에서 6[kWh]으로 증가한다. 여기서 충전 전력량을 전압 220[V]로 나누어 계통이 공급하는 전류값을 구하면 R상의 경우 54.5[A]에서 27.3[A]으로 감소하고 S상은 40.9[A]로 변동이 없으며, T상은 0[A]에서 27.3[A]으로 증가한다.

TABLE X
REDISTRIBUTION OF CHARGING ELECTRIC POWER QUANTITY

Time Zone		20:00	20:15	20:30	20:45	CEPQ [kWh]
EV No.		~20:15	~20:30	~20:45	~21:00	
R	EV #1	1.5	±5	1.5	±5	6
	EV #2	1.5	±5	1.5	±5	
S	EV #3	1.5	1.5	1.5	1.5	9
	EV #4	0.75	0.75	0.75	0.75	
T	EV #1		1.5		1.5	6
	EV #2		1.5		1.5	

이 값을 이용하여 각 상의 전원에서 간단하게 전류 불평형률(Current Unbalance Factor : CUF)을 구하는 식 (7)^[13]에 적용하면 20시간대의 전류불평형률은 식 (8) 및 식 (9)와 같이 171.4%에서 42.8%로 감소한다.

$$CUF = \frac{3[\max(|I_R|, |I_S|, |I_T|) - \min(|I_R|, |I_S|, |I_T|)]}{|I_R| + |I_S| + |I_T|} \times 100\% \quad (7)$$

$$CUF_{without\ transfer\ SW} = \frac{3 \times [54.5 - 0]}{54.5 + 40.9 + 0} \times 100\% = 171.4\% \quad (8)$$

$$CUF_{with\ transfer\ SW} = \frac{3 \times [40.9 - 27.3]}{27.3 + 40.9 + 27.3} \times 100\% = 42.8\% \quad (9)$$

이때 배터리에서 3[kWh]를 S상에 공급하면 계통에서 공급하는 충전 전력량은 세 상 모두 6[kWh]가 되어 전류불평형률은 식 (10)과 같이 42.8%에서 0%로 더욱 감소되어 계통에서 공급하는 전류가 평형하게 된다.

$$CUF_{with\ battery} = \frac{3 \times [27.3 - 27.3]}{27.3 + 27.3 + 27.3} \times 100\% = 0\% \quad (10)$$

따라서 본 논문에서 제안한 충전 스케줄링 제어알고

리즘에 의해 전기자동차 충전부하를 재분배하여 각 상의 전원에서 불평형을 개선하고 부족한 전력을 제안한 시스템의 배터리에서 공급하면 계통 전원에서 전류불평형이 개선될 뿐만 아니라 배터리 설치용량이 최소화되어 효율적 이용이 가능하다. 또한 공동주택 단지에 다수 대의 분전반이 설치되는 점을 고려할 때 그 효과가 더욱 클 것으로 예상된다.

7. 결 론

본 논문에서는 기존의 충전기용 분전반과 달리 에너지 저장장치를 포함하고 충전 스케줄링을 기반으로 하는 전기자동차용 스마트 분전반을 제안하였다.

제안한 시스템은 3상 충전회로, 배터리, 방전회로와 절체스위치 및 제어기로 구성된다. 정상시 전기요금이 저렴한 심야 또는 경부하시간대에 배터리를 충전하였다가 충전 스케줄링 제어알고리즘으로 전기자동차 충전부하를 사전에 예측하여 피크부하와 전류불평형을 억제하고 정전 시에도 완속충전기에 비상전력을 공급하도록 하였다.

또한, 제안한 시스템의 유용성을 확인하기 위하여 Case별로 시뮬레이션과 실험을 시행하고 사례 분석을 수행하였다. 그 결과, 제안한 충전 스케줄링 제어알고리즘으로부터 정해진 변압기 용량 범위 내에서 보다 저렴한 충전요금으로 충전이 가능할 뿐만 아니라 다중 분산된 전기자동차의 동시 충전으로 인한 피크부하와 전류불평형 문제의 해결이 가능한 결과를 얻었다. 정전 시에도 배터리로부터 완속충전기에 비상전력의 공급이 가능할 뿐만 아니라 전기자동차에 AC전원과 동시에 DC전원의 공급이 가능한 이점이 있다. 특히, 전원설비 용량이 부족한 공동주택 단지에 전기자동차 충전시스템을 설치할 경우 본 연구결과가 유용할 것으로 예상된다.

References

- [1] J. Carlos Gomez and M. M. Morcos, "Impact of EV battery chargers on the power quality of distribution systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 18, No. 3, pp. 975-981, 2003.
- [2] Seoul Metropolitan Government, "Item and review criterion of the environmental impact assessment on building and maintenance business (redevelopment & reconstruction)," The Environmental Impact Assessment Bylaw, Clause 29, Article 2, 2011.
- [3] Electricity Supply Agreement, Korea Electric Power Corporation, 2014.
- [4] Land and Housing Research Institute of Korea, "A development of the software to estimate economics for combined heat and power generation systems in apartment estates," 2005.

- [5] Electric and Information Communication in Apartments - Design Guidelines, Korea Land & Housing Corporation, 2010.
- [6] Consumer's Electrical Installation Guide, Section 115, Korea Electric Association, 2006.
- [7] Electric Vehicle Charging Infrastructure Installation and Operation Instructions, Ministry of Environment, 2012.
- [8] S. Y. Lee, Y. M. Seo, M. S. Kim, and S. C. Hong, "Boost type inverter system for compensation of voltage sag," *Proceedings of International Conference on Power Electronics-ECCE Asia*, pp. 2757-2762, 2011.
- [9] M. Yilmaz and P. T. Krein, "Review of battery charger topologies, charging power levels, and infrastructure for plug-in electric and hybrid vehicles," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 28, No. 5, 2013.
- [10] Korea Smart Grid Agency, Construction of Electric Vehicle Charging Infrastructure Policy Research Report, 2010.
- [11] M. S. Kim and S. C. Hong, "Set up a demand factor of EV chargers and its control method in apartments," *Journal of KIIEE(The Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers)*, Vol. 28, No. 8, Aug. 2014.
- [12] Y. M. Ki, B. I. Kim, Y. M. Ko, C. H. Oh, S. H. Yang, and S. Y. Lee, "Model for EV charging distribution system in apartments", *Proceedings of Spring Joint Conference on the KIE-KORMS*, pp. 1804-1812, 2014.
- [13] J. G. Kim, "A new analysis for load unbalance factor," *Transactions of KIEE(The Korean Institute of Electrical Engineers)*, Vol. 55P, No. 2, 2006.



김명수(金明秀)

1968년 10월 23일생. 1997년 단국대 전기공학과 졸업. 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2015년 동 대학원 전자전기공학과 졸업 예정(공학). 1997년~현재 한국토지주택공사 차장.



홍순찬(洪淳瓚)

1950년 2월 24일생. 1973년 서울대 전기공학과 졸업. 1975년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1975~1978년 해군사관학교 교수부 전기공학실 전임강사. 1978년~현재 단국대 전자전기공학부 교수. 1986~1987년 미국 텍사스 A&M 대학교 방문교수. 1997~2000년 대한전기학회 이사. 2002년 당학회 회장. 2002~2005년 단국대 공과대학 학장.