무선전력전송 차량 급전인버터에 대한 SFES 활용방안연구

Voltage regulation method for power subsystem of DC based wireless rechargeable Electric Vehicle

정승민*, 정환수**, 장길수*†

Seungmin Jung*, Hwan-Su Jung**, Gilsoo Jang*†

Abstract It is recommended to establish the power subsystem nearby the transformer because the charging system usually demands significant power. However, as the system is usually built in urban area and it makes hard to construct the subsystems at every station, low voltage conditions can generate in power subsystem that is some distance from the distributed transformer. Recently, the DC distribution system is introduced and has possibility to solve the above issue. In this paper, SFES is introduced to solve the voltage drop under the low voltage distribution system. The case study to utilize the SFES by using DC power flow analysis is carried out and it is tested in this paper.

Keywords **:** Wireless charging system, Inductive power transfer, DC network, Electric vehicle, Voltage regulation.

초 록 현재 개발되고 있는 무선전력전송 차량충전시스템은 교류를 공급받아 인버터에서 고주파 전력으로 변환하여 차량에 무선으로 전력을 공급하는 형태이다. 최근 변환 과정에서의 손실과 타 변전설비와의 연계 문제를 개선하기 위해, 무선전력전송 충전인버터에 공급하는 전기시스템을 직류로 구성하여 문제를 해결하고자 하는 방안이 연구되고 있다. 본 논문에서는, 해당 직류시스템을 바탕으로 최근 주목 받고 있는 플라이휠 에너지 저장장치를 활용하여 차량 충전 시 발생할 수 있는 저전압 현상을 개선하고 효율적인 에너지 수급을 진행하도록 진행하고자 하였다. 순간적인 전력 공급을 요하는 초고주파 충전 인버터에 대응할 수 있도록 EMTDC 시스템을 구성하였다.

주요어 : 무선전력전송, 직류배전, 전압보상기법, 에너지저장장치, 플라이휠

1. 서 론

전기자동차의 보급이 확산될 경우 기존 정류장이나 주차장에서 차량을 충전하는 방향을 벗어나 효율적이고 즉각적인 운영을 위해 정차장소 및 저속구간에서 무선충전을 시도할 수 있는 가능성이 있다.

† 교신저자: 고려대학교 공과대학 전기전자공학부(gjang@korea.ac.kr)

* 고려대학교 공과대학 전기전자공학부, ** 한국철도기술연구원

전기자동차 무선충전 시스템의 경우 달리는 차량에 전기를 무선으로 공급하여 충전, 운행

이 이루어지는 시스템으로 현재 국내에서 시행 및 상용화가 진행되고 있다. 이와 같은 시스템이 국내에서 운영되기 위해서는 전기자동차 충전에 대한 모니터링 및 스케줄링 기술이 정립되어야 하며, 안정적으로 전기를 공급받기 위해 새로운 시스템의 계통연계에 대한 분석이 진행되어야 한다[1].

현재 구성되어있는 무선전력전송 차량용 충전인버터 시스템은 한전으로부터 교류전력을 공급받아 충전인버터 내부에서 SCR 정류기를 이용, 직류로 변환하여 IGBT를 구동한다. 이러한 시스템의 문제점은 변환손실이 너무 크고 스위칭 동작이 너무 많다는데 있다. 한전으로부터 교류전력을 공급받는 변전설비에서 다이오드 정류시스템을 구성, 충전인버터 앞단에서 직접적으로 직류전원을 공급하도록 하여 변환 손실을 줄이고자 하는 연구가 선행되었으며, 다수의 이점을 바탕으로 추가적인 연구가 진행되고 있다[2]. 본 논문에서는 해당 시스템을 기반으로 빠른 응답특성을 보유한 초전도 플라이휠을 적용하여 전압보상기법을 제시하고자 한다. 무선전력전송과정에 요구되는 초고주파 인버터의 동작을 보조하는데 초점을 맞추어 동작하도록 시뮬레이션을 설계하였으며, 기본 계통의 전압 변동과 보상 효과를 제시하였다.

2. 본 론

2.1 무선급전시스템 연계기법

무선전력전송 시스템은 고주파를 바탕으로 공진 시스템을 활용하기 때문에 안정적인 전력공급이 우선적으로 요구되며, 일정한 전압을 유지하기 위한 계통 측에서의 보조 장치 연계가 요구되기도 한다. 고주파 인버터의 빠른 스위칭 동작에 능동적으로 대처하기 위해서는 보조 장치 또한 빠른 응답특성이 요구되며, 이를 고려하여 초전도 에너지 저장장치인 Superconducting Flywheel Energy Storage (SFES) 이용, 전압 보상기법 연구를 진행하였다. Fig. 1은 무선충전시스템에서 SFES를 연동할 시 예상되는 연계지점 및 전압 보상 개념을 나타낸 것이다. 일반적으로 전압 강하가 예상되는 지점은 변전소 중앙으로 전달되는 전류에 의해 발생하는 전압 강하가 가장 클 것으로 예상되는 곳이다.

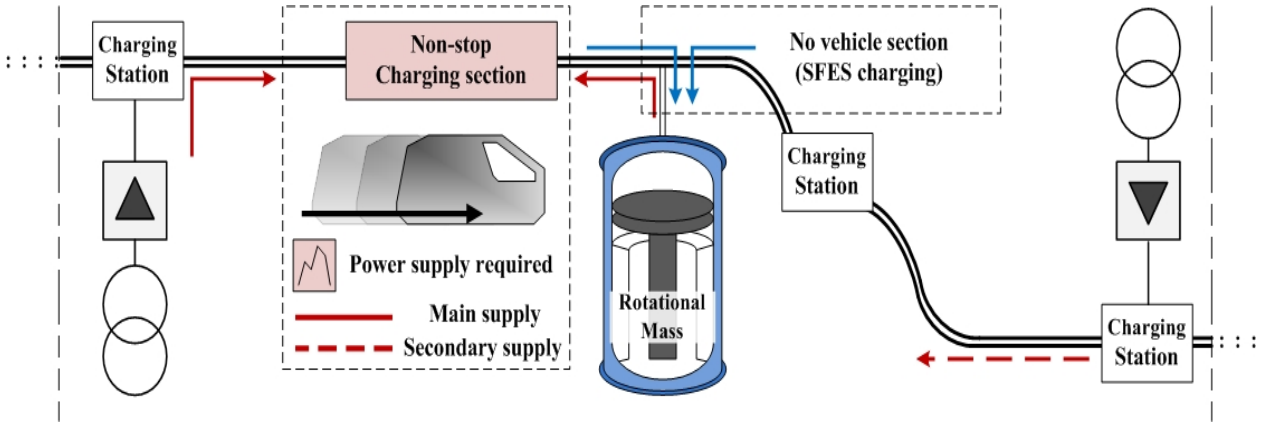

Fig. 1 Overview of the SFES operation in design system (specific section of the entire route)

기 연구된 무선전력전송 시스템 구성도를 활용하여 전압 변동 폭이 가장 큰 두 변전설비 중앙지점에 에너지 저장장치 연계 방안을 구축하고자 한다. 해당 과정에서 전압 예측에 필요한 전력조류계산 시에는, 기 연구된 DC 전력조류계산을 참고하여 변전소는 norton equivalent technique으로 차량은 임피던스로 등가화 하였다 [3]. 전체 노선에 대하여 상행, 하행 노선을 감안하여 충전인버터를 하나의 모선으로 설정하여 조류계산을 수행하였다.

활용되는 에너지를 재충전하기 위해서 특정 조건 하에서 SFES의 충전이 이루어져야 한다. 교통시스템 특성상 연계지점 인근 변전소 사이에 차량이 없는 경우, 차량충전시스템에 무리를 주지 않고 충전이 가능하며, 효율적인 SOC (State of charge) 관리를 수행할 수 있다. 전압변동을 효과적으로 관리하기 위해 SFES의 용량 계산이 필요하게 되는데, 이는 연계지점의 거리를 고려한 다음의 식을 이용하여 계산하였다.

$$E_{SFES} = (1 - D_{inv} / D_{sub}) t_c \delta P_{\max} \quad (1)$$

여기서, D_{inv}는 SFES와 충전인버터 사이의 거리, D_{sub}는 SFES와 변전소 사이의 거리, P_{max}는 충전인버터에서 요구되는 최대전력을 의미한다.

차량의 이동특성 및 충·방전 시간의 경우, 기 계획된 운행패턴을 활용하여 반영하였으며 [4], 복수의 차량이 동 시간대에 운행하는 것에 초점을 맞추어 시뮬레이션을 진행하였다. 기존 스케줄링 과정을 통해 인근의 충전인버터에서 동시에 차량을 충전하는 것을 방지하게 되므로, SFES는 하나의 충전인버터에 초점을 맞추어 운용될 수 있다.

2.2 시뮬레이션

2.2.1 시스템 구성

IEEE 기준 DC 무선전력전송 충전시스템 설계 예시를 바탕으로 PSCAD를 모의하여 상세한 전압변동 및 최대전력 저감 효과를 확인하고자 한다. 운행 시간은 1400초를 모의하였으며 세부 디자인은 Fig. 2에 나타난다.

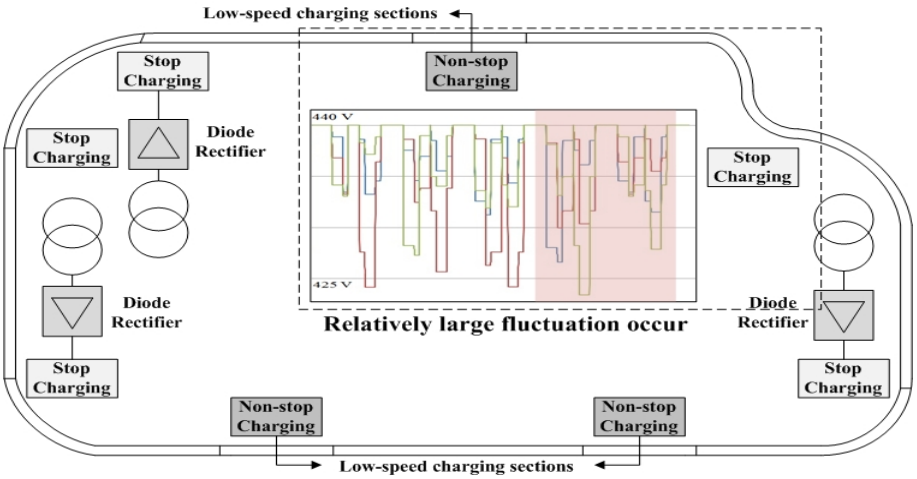

Fig. 2 PSCAD simulation structure for DC charging system

기존 시스템에서 발생하는 전압 강하 현상 지점에 SFES를 구성하여 전압 보상 신호를 입력하고자 한다. 차량의 충전 요구 시간(t_c)과 충전 지점에서의 상대적 거리(D_{inv}, D_{sub})를 이용하여 충·방전 패턴을 결정하였으며, Fig. 1에 표시된 위치에 SFES를 EMTDC로 구성/연계하였다.

2.2.2 시뮬레이션 결과

Fig. 3, 4는 구성된 무선전력전송 충전시스템에 전력을 공급하는 변전소에서 공급되는 유효전력 출력을 나타낸다. SFES 연계 전·후의 피크전력이 SFES의 방전으로 인해 크게 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 변전소의 기본요금이 피크전력 측정을 바탕으로 산정되는 것임을 고려할 때, 해당 보상방안은 비용적인 측면에서 효과를 나타낼 것으로 보인다. Fig. 5, 6은 본 연계방안의 주요 목적인 전압개선효과를 나타낸다. 변전소 기준으로 최저전압이 0.96 p.u. 까지 낮아지는 현상을 크게 개선하는 것을 확인할 수 있다. 이전에 언급한 바와 같이, 차량이 없는 시간동안 SFES는 충전을 진행하며, 해당 구간에서의 전압 변동은 타 전압강하 현상에 비해 크지 않아 계통에의 영향은 미미할 것으로 예상된다.

Table 1은 각 변전소의 전압 변동 개선 효과 및 최대전력 저감 효과를 나타낸 것이다. SFES 연동 전과 비교 시, 전압 변동은 최대 432.33 V 까지 완화되는 것을 확인할 수 있으며, 최대전력은 30% 이상 감소하는 것을 확인할 수 있다.

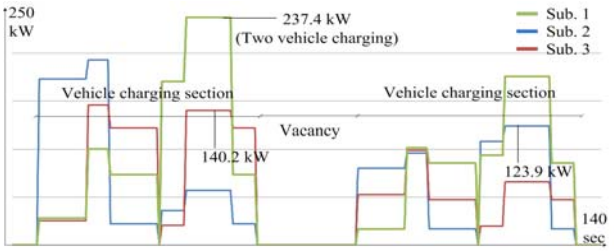

Fig. 3 Power curve in the designated section (without SFES)

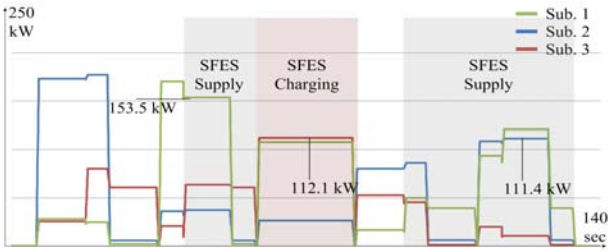

Fig. 4 Power curve in the designated section (with SFES)

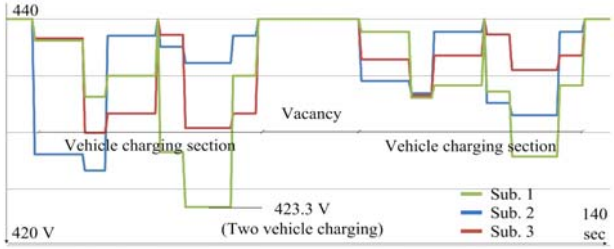

Fig. 5 V fluctuation at the designated section (without SFES)

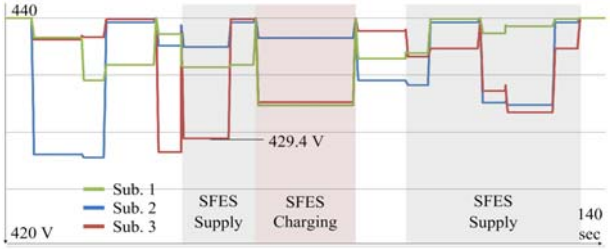

Fig. 6 V fluctuation at the designated section (with SFES)

Table 1 Numerical results of the simulation

Substation	Lowest voltage (Target section)		Peak power (Target section)		SFES Power capacity
	Non SFES	With SFES	Non SFES	With SFES	
Substation 1	423.32 V	432.33 V	237.45 kW	153.52 kW	204.98 kW
Substation 2	431.51 V	432.39 V	123.89 kW	111.38 kW	175.61 kW
Substation 3	430.37 V	429.43 V	140.24 kW	112.12 kW	246.23 kW

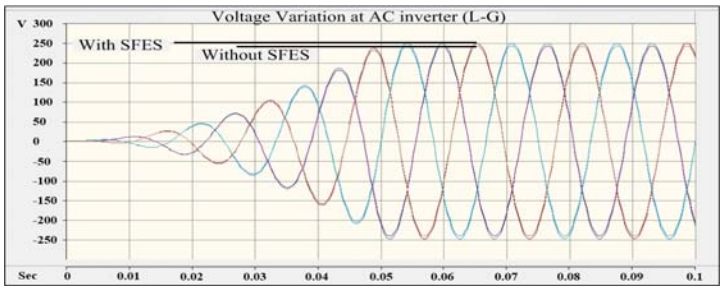

Fig. 7 Inverter voltage improvement with proposed application

Fig. 7에 나타난 바와 같이, 인버터 측 전압변동은 SFES 연동을 통해 거의 사라지는 것을 확인할 수 있다. 충전인버터에 의한 계통 측면에서의 전기 품질은 선간전압을 보면 알 수 있듯, 안정적으로 유지할 수 있다.

3. 결 론

무선전력전송 충전인버터는 교통시스템 특성 상 비교적 장거리 송전이 발생할 경우가 높으며, 배전계통에 연계될 가능성이 높기 때문에 저전압 현상이 발생할 확률이 높다. 특히 순간적으로 큰 에너지를 소비해야 하는 충전인버터는 큰 전류소비로 인한 전압강하에 대비해야 할 것으로 보인다. 본 연구에서는 전력전자소자로 구성된 충전인버터와의 빠른 응동을 위해 SFES를 구성하여 효과적인 전력 수급 및 전압보상을 진행하였으며, 저전압 현상과 피크전력 개선 효과를 확인하였다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (No. 20134030200340) (No. 20131020000100)

참고문헌

[1] van der Pijl F., Castillia M., Bauer P. (2013) Control Method for Wireless Inductive Energy Transfer Systems with Relative Large Air Gap, IEEE Trans. Industrial Electronics, 60, pp. 382-390.

[2] Seungmin J., Hansang L., Chong Suk S., Jong-Hoon H., Woon-Ki H., Gilsoo J. (2013) Optimal Operation Plan of the On-Line Electric Vehicle System through Establishment of DC Distribution System, IEEE Trans. Power Electronics, 28, 5878-5889.

[3] Seungmin J., Hansang L., Gilsung B., **Gilsoo J., Sae-Hyuk K., Hosung J., Hyungchul K. (2011) A Study of improving regenerative energy utilization in Urban DC railway systems through sharing substations, The Transaction of KIEE, 60(12), pp. 2392-2396.**

[4] Huh J., Wooyoung L., Gyu-Hyeong C., Byunghun L., Chun-Taek R. (2011) Characterization of novel inductive power transfer system for On-Line Electric Vehicles, 26th annual Conf., Applied Power Electronics Conference and Exposition , pp. 1975-1979.