

전기자동차 충전부하의 이동성을 고려한 전송 전력량의 해석 및 개선

김덕영
군산대학교 전기공학과

Analysis and improvement of transfer power capability considering movable load charging of EV

Deok Young Kim

Dept. of Electrical Engineering, Kunsan National University

요약 본 논문은 전기자동차의 충전부하 이동성에 의한 전력시스템 선로에서의 전송전력에 대한 해석과 개선에 대한 내용을 제시하였다. 전기자동차는 화석연료의 고갈과 환경보호의 중요성이라는 측면에서 사용범위가 크게 늘어나고 있으며, 가까운 미래에 가솔린 연료를 사용하는 운송수단을 대체할 것으로 예상되고 있다. 기존의 예측된 고정 부하량에 기초한 전력시스템에서 전기자동차의 이동성 충전부하는 특정 지역에서 이동성 충전부하의 증가로 인한 전송선로에서의 전송전력 집중과 과부하의 문제를 발생시킨다. 이러한 현상의 해석을 위해 New England 시험계통을 부하특성을 기반으로 4개의 지역으로 분할하여 전기자동차 충전부하의 이동을 고려한 예상 시나리오를 가정하였다. 예상 시나리오에서는 표준이 되는 전기자동차의 충전용량을 고려하여 지역단위의 부하량을 최대 31%까지 증가하면서 선로에서의 전송전력 집중과 과부하 현상을 해석하였다. 이러한 선로에서의 과부하 문제에 대한 해결책으로 TCSC를 과부하가 발생한 선로에 직렬 연결하여 선로의 전송전력을 선로제한값 보다 작은 부하율 100% 이내의 값으로 직접 제어할 수 있도록 하였다. 시뮬레이션 결과로부터 전력시스템에 몇 개의 TCSC를 적용함으로써 전기자동차의 이동성 부하 충전에 의한 선로에서의 전송전력 문제를 효과적으로 그리고 경제적으로 해결할 수 있음을 보였다.

Abstract This paper presents an analysis for improving the power transfer capability in transmission lines caused by the movable load charging of electric vehicles (EVs). EVs are expected to be used more widely and replace gas fuel vehicles in the near future due to the shortage of fossil fuels and for environmental preservation. Movable load charging of EVs could lead to the convergence of transferred power flow and overloading conditions in transmission lines in a specific area of a power system, which is conventionally based on estimated fixed load capability. To analyze these conditions, the New England Test System was divided into four regions based on the load characteristics, and different charging scenarios were considered. In these scenarios, the regional power load was highly increased to 31% based on the standard charging capacity of an EV. As a solution to the overloading problem of transmission lines, a TCSC was installed serially on the overloaded line to directly control the transferred power under limited line capability (100% load capability). The simulation showed that the application of a few TCSCs could efficiently and economically control the line capability problem caused by movable load charging of EVs.

Keywords : Electric Vehicle, Load Charging, Movable Load, TCSC, Transmission Line Capability

1. 서론

전기자동차는 스마트그리드 사업의 중점분야 중의 하나

로서 기존 화석연료의 고갈과 환경 친화적인 관점에서 관심이 크게 증가하고 있으며 가까운 미래에 기존의 화석연료를 사용하는 운송수단을 대체하여 주 운송수단으

본 논문은 2011년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2011-0012638)

*Corresponding Author : Deok Young Kim(Kunsan National Univ.)

Tel: +82-63-469-4746 email: dykim@kunsan.ac.kr

Received November 17, 2017

Revised (1st December 6, 2017, 2nd December 7, 2017)

Accepted December 8, 2017

Published December 31, 2017

로 사용될 것으로 예상되고 있다. 전력산업의 측면에서 전기자동차와 전력시스템의 연관성은 자동차 충전 배터리 부하의 충전시간과 용량 그리고 독립전원으로서의 역할이라고 할 수 있으며, 전기자동차의 충전 배터리는 기존의 부하와는 달리 부하의 이동성이라는 특징을 갖는다.

즉 기존의 전력계통이 장기적인 부하예측을 통해서 전력설비와 전력망을 구성하고 전기에너지를 공급하는 방식인 반면에, 전기자동차가 새로운 부하로서 전력시스템에 연계되면서 전체 부하 중에서 일부를 차지하는 전기자동차 충전용 부하가 이동성을 갖게 된다는 새로운 문제가 발생된다[1]. 이러한 문제점은 기존의 전력설비가 예측된 부하량을 기준으로 설계된 것임을 고려할 때, 전체적인 발전량의 수급에는 문제가 없더라도 전기자동차의 이동성 부하로 인해 전력전송 측면에서 특정지역의 선로에 전송전력이 집중되는 현상이 발생하게 된다. 이 경우 선로를 포함한 전체적인 설비의 증설을 통한 문제 해결은 경제성 및 시스템 효율성의 저하를 불러일으켜서 적절치 않은 것으로 판단된다. 이러한 문제에 대한 해결 방법으로 기존의 FACTS 설비 중에서 전송전력량의 직접 제어에 큰 영향이 있는 TCSC(Thyristor Controlled Series Capacitor)를 사용하여 선로의 물리적 전송전력의 제한범위내에서 전송전력의 집중현상을 최대한 낮추는 것이 적합한 방법이라고 생각된다.

본 논문은 정적해석 및 안정도 평가에 일반적으로 사용되는 New England 모의계통을 부하특성을 고려하여 4개의 지역으로 구분하고, 전기자동차 충전부하의 이동성에 대한 가상 시나리오를 설정하려고 한다. 전기자동차의 이동성 부하에 의해 발생하는 선로에서의 전송전력 집중현상 해석과 이를 개선하기 위해 과부하인 선로에 TCSC를 설치하여 전송전력량의 효과적인 제어가 가능함을 시뮬레이션 해석결과를 통해 보이고자 한다.

2. 본론

2.1 전기자동차 충전방식 및 부하량

본 논문은 보급형 전기자동차로 많은 판매량을 보이는 일본 닛산 자동차회사의 리프(Leaf)를 전기자동차의 표준모델로 사용하였다. 리프 전기자동차의 충전모습과 리튬-이온 배터리를 그림 1과 그림 2에 나타내었다. 리

프는 리튬이온 배터리만을 사용하는 전기자동차로 주요 제원은 다음과 같다[2].



Fig. 1. Battery load charging of EV



Fig. 2. Li-ion battery of EV

- 주행가능거리 : 160km/100miles
- 최고속도 : over 140km/h
- 타입 : AC 모터
- 최고출력 : 80kW
- 최대토크 : 280Nm
- 타입 : 판형 리튬-이온 배터리
- 배터리 용량 : 24kWh
- 모듈수 : 48
- 충전시간 : 고속충전 30분 이하 (DC 50kW 고속충전기), 가정충전 8시간 (AC200V)

국내의 경우 외국에 비해 전기자동차의 보급은 초기 단계의 진행과정을 보이고 있으며, 예상되는 전기자동차의 수요와 충전에 소요되는 전력량은 표 1과 같다[2].

Table 1. Estimation of EV and charging capacity

Years	2020
Total No. of Cars	1,265,000
No. of EVs	64,900
EV market share	5.1%
Charging load capacity[MWh]	1557.6

2.2 TCSC 모델

전송전력의 증가를 위한 기본적인 방법으로는 전송선로의 회선수 증가나 계통전압의 승압을 들 수 있다. 이러한 경우 선로의 회선수 증가에 따른 철탑구조물의 건설 등의 과정이 필요하며, 승압의 경우도 새로이 고전압용 구조물과 절연설비, 고전압용 선로 등이 건설되어야 하는 과정이 수반되어 많은 비용의 증가와 시간소요의 문제가 발생된다. 본 논문에서는 기존 선로의 증설이나 사용전압의 승압이 없는 상태에서 전송전력을 증가시키기 위한 방법으로 기존 선로에 직렬로 TCSC를 설치하는 방법을 사용하였다[1,4].

직렬형 무효전력 보상기 TCSC는 전력계통에 직렬로 연결된 가변 리액터와 고정된 커패시터로 구성되며, 싸이리스터에 의하여 선로의 임피던스와 무효전력을 보상하는 설비이다. TCSC는 설치된 선로의 임피던스를 제어함으로써 선로에 흐르는 유효전력을 효과적으로 제어할 수 있으며, 안정도측면에서 계통의 제동특성을 증가시키는 효과가 있는 것으로 알려져 있다. TCSC가 선로에 설치된 경우의 계통도와 TCSC의 제어블럭을 그림 3과 그림 4에 나타내었다[3,4].

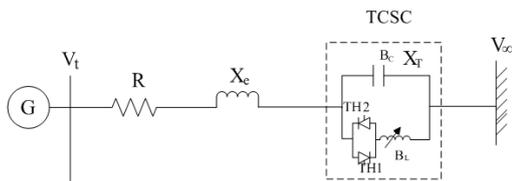


Fig. 3. System diagram with TCSC in tr. line

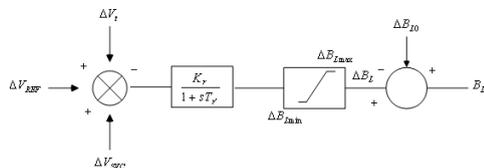


Fig. 4. Control block of TCSC

전기자동차의 이동성 충전부하에 의한 선로에서 전송 전력 집중현상 및 TCSC 설비에 의한 선로 과부하 개선 효과는 전력계통 해석용 소프트웨어인 Power World Simulator를 사용하여 해석하였다. Power World Simulator는 전력시스템의 거의 모든 분야에서 사용되고 있는 검증된 소프트웨어이며, 해석에 사용한 TCSC 모델 및 파라미터는 Power World Simulator의 제공모델을 사용하였다[5].

2.3 New England Test System

전기자동차의 충전에 의한 이동성 부하의 영향을 해석하기 위한 모의계통으로 10 발전기 39 모선으로 구성된 New England Test System을 사용하였다[3].

그림 5의 계통도에서 선로는 2회선으로 구성하였으며 2회선 선로당 전송전력의 제한값은 선로의 물리적 제한값인 400MVA로 설정하였다. 선로에 주황색의 원으로 표시된 부분은 해당선로의 전송전력이 전력제한치의 80% 이상인 경우를 나타낸 것이며 전송전력이 제한치의 100% 이상을 초과하는 경우 빨간색으로 나타나게 하였다. 그림 5의 기본 케이스인 경우에 4개의 선로가 전송전력이 제한치의 90% 이상인 것을 그리고 2개의 선로가 80% 이상인 것을 나타내고 있다. 이는 New England 모의계통이 정상적인 상황에서도 선로의 전송전력이 제한값에 가까이 운영되고 있는 중부하 계통임을 나타낸다.

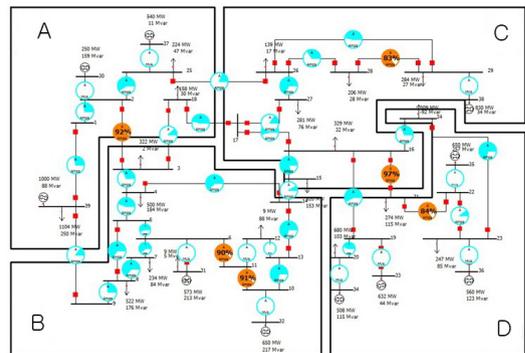


Fig. 5. New England System with 4 regions

그림 5의 New England 모의계통에 전기자동차 충전 부하의 이동성을 고려하기 위해 편의상 계통을 4개의 지역으로 구분하였으며, 대규모 부하가 있는 A 지역을 대도시, B 지역은 베드타운 역할을 하는 인근의 위성도시,

C 지역은 산업도시, 그리고 D 지역은 관광지라 가정하였다.

그림 5의 계통도에서 일반적인 전기부하의 패턴상 대도시인 A 지역과 베드타운인 B 지역사이에서는, 전기자동차를 의미하는 이동성 부하가 주간시간에는 A 지역에 몰릴 것이 예상되고, 그 외의 시간에는 베드타운의 역할을 하는 B 지역으로 이동성 부하가 이동하여 충전부하의 역할을 할 것으로 예상된다. 산업지역으로 구분한 C 지역은 부하량이 비교적 일정량이 유지되는 것으로 생각할 수 있으며, 관광지역으로 가정한 D 지역의 경우 주말이나 휴가철에 이동성 부하가 집중될 것으로 예상할 수 있다. 그림 5에서 각 지역별 부하량의 총합인 유효전력량과 무효전력량을 표 2에 나타내었다.

Table 2. Load capacity of 4 regions

Load Capacity	A City	B Bed town	C Industry	D Resort
P[MW]	1483	1585.5	1554.5	1510.5
Q[MVar]	327.2	539	332.3	210.4

표 2의 지역별 부하량에서 자동차의 충전부하가 특정 지역으로 이동하는 경우는 특정지역을 제외한 나머지 지역의 부하량의 중에서 일정 %의 부하가 특정지역으로 이동하는 경우를 가정하였다. 즉 계통의 전체부하의 합은 동일한 상태에서 이동성 부하에 의해 특정지역의 부하가, 나머지 지역 부하의 감소량의 합만큼 증가하는 경우를 가정하였다.

3. 사례연구

4개의 지리적 영역으로 구분된 New England 모의계통을 대상으로 전기 자동차 충전부하의 이동에 의해 발생하는 선로의 전송전력 집중현상을 해석하기 위해 다음과 같은 시나리오를 가정하였다.

- 사례 1 : 전기자동차의 충전부하가 지역 B에 집중되어 B 지역의 부하량이 15% 증가한 경우
- 사례 2 : 전기자동차의 충전부하가 지역 D에 집중되어 D 지역의 부하량이 31% 증가한 경우

3.1 전기자동차 부하가 지역 B에 집중된 경우

그림 6은 베드타운의 역할을 하는 위성도시인 B 지역에 전기자동차의 충전부하가 이동하여 전체 부하량이 증가하는 경우를 나타낸 것이다. A, C, D 3개 지역에서 각각 5% 정도의 부하가 위성도시인 B 지역으로 이동하여 충전부하로 사용되는 경우를 나타낸 것으로 계통 전체 부하의 합은 동일하나 B 지역의 부하량은 15% 증가하였다.

영역별 전체 부하량의 변화와 전기자동차 배터리 용량을 단순 비교한 이동차량의 수는 표 3과 같다.

Table 3. Regional load capability change of case 1

Load	A	B	C	D
P[MW]	-74.15	+237.40	-77.73	-75.53
Q[MVar]	-16.36	+43.5	-16.62	-10.52
No. of EV	-3,090	+9,892	-3,239	-3,147

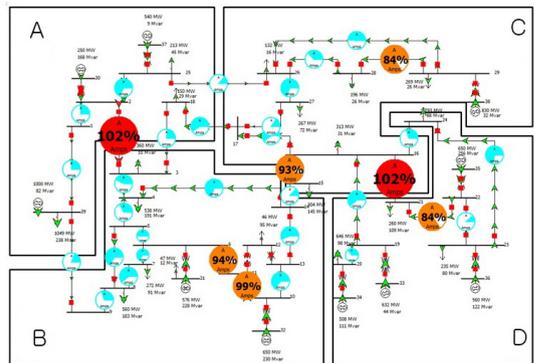


Fig. 6. Load capability of case 1 without TCSC

그림 6의 전송전력 해석결과 빨간색으로 표시된 2-3번 모선사이의 선로와 16-21번 모선사이의 선로가 전송전력 한계치를 초과하여 각각 102%의 전력이 전송되고 있는 것을 알 수 있다. 자동차 충전부하의 지역 B에의 집중현상에 의한 선로의 과부하 상태를 해소하기 위해, 과부하 상태인 두 개의 선로에 직렬로 TCSC를 설치하여 특정선로의 과부하가 완화되도록 하였다. 이 경우 TCSC의 설치에 의해 과부하 선로의 전송전력을 감소하였으나, 새로이 15-16 선로와 10-11선로에서 전송전력이 제한값에 가까워지는 현상이 발생하여, TCSC를 이들 선로에 추가로 설치하여 전체 시스템에서의 전송전력을 제한값내로 제어되도록 하였다.

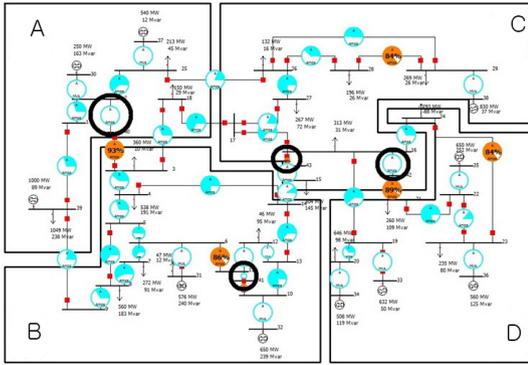


Fig. 7. Load capability of case 1 with TCSC

그림 7은 이들 4개의 선로에 TCSC를 설치하여 선로에서 전송전력의 과부하 상태를 완화시킨 결과를 나타낸 것이다. 이 때 TCSC의 설치에 의한 선로의 전송전력의 변화는 표 4와 같다.

Table 4. Transmission line load capacity of case 1

Tr. lines	without TCSC			with TCSC		
	P [MW]	Q [MVar]	Load Capacity [%]	P [MW]	Q [MVar]	Load Capacity [%]
2-3	409.53	117.96	101.97	365.1	113.5	94.95
10-11	393.90	72.48	98.96	348.5	63.1	89.37
15-16	353.37	119.58	92.95	340.2	114.6	91.74
16-21	409.92	72.86	102.31	361.3	58.4	91.28

표 4에서 부하율이 101.97%, 102.31%였던 2-3, 16-21선로의 전송전력이 TCSC 설치 후 적정 전송용량의 범위인 94.95%, 91.28%로 감소한 것을 알 수 있다.

3.2 전기자동차 부하가 지역 D에 집중된 경우

그림 8은 관광도시로 가정하 D 지역에 자동차의 충전 부하가 이동하여 D 지역의 전체 부하량이 증가하는 경우를 나타낸 것이다. A, B, C 3개 지역에서 각각 10% 정도의 부하가 관광도시인 D 지역으로 이동하여 충전부하로 사용되는 경우를 나타낸 것으로 계통 전체 부하의 합은 동일하나, 지역 D의 부하량은 31% 증가하였다. 지역별 전체 부하량의 변화와 전기자동차 배터리 용량을 단순 비교한 이동한 전기자동차의 수는 표 5와 같다.

Table 5. Regional load capability change of case 2

Load	A	B	C	D
P[MW]	-148.3	-158.55	-155.45	+461.9
Q[MVar]	-32.72	-53.9	-33.23	+119.85
No. of EV	-6,179	-6,606	-6,477	+19,246

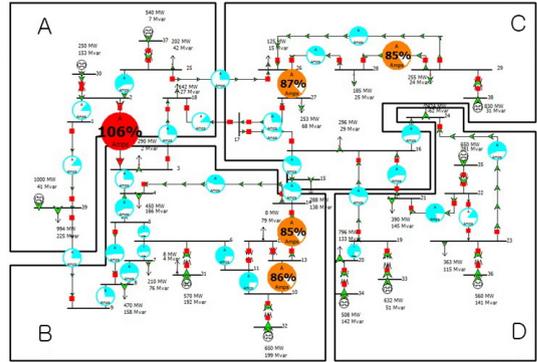


Fig. 8. Load capability of case 2 without TCSC

그림 8의 조류해석결과 2-3선로의 경우 제한치를 초과하여 106%의 전력이 전송되는 선로 과부하 현상이 나타나는 것을 알 수 있으며, 이 경우는 전송전력이 제한치를 초과한 2-3선로와 2-3선로에 TCSC를 설치시 선로 부하용량이 제한값에 가까이 상승한 26-27 선로에 직렬로 TCSC를 설치하여 전송전력의 집중현상이 완화되도록 하였다.

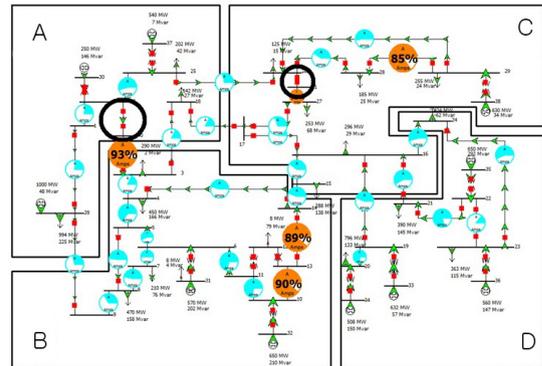


Fig. 9. Load capability of case 2 with TCSC

그림 9는 그림 8에서 전력집중 현상이 나타난 2-3번 선로와 추가로 26-27 선로에 TCSC를 설치한 경우의 전

송전력 해석 결과로 해당 선로뿐 만 아니라 전체 시스템의 전송전력이 제한값 범위내에서 제어되고 있음을 보여준다. 이 때 TCSC의 설치에 의한 과부하 선로에서 전송 전력의 변화는 표 6과 같다.

Table 6. Transmission line load capacity of case 2

Tr. lines	without TCSC			with TCSC		
	P [MW]	Q [MVar]	Load Capacity [%]	P [MW]	Q [MVar]	Load Capacity [%]
2-3	433.05	101.56	106.15	372.9	66.3	92.82
26-27	353.62	80.44	86.58	372.8	83.7	92.47

표 6에서 부하율이 106.15%였던 2-3선로의 전송전력이 TCSC 설치 후 92.82%로 감소하여 적정 전송용량의 범위내로 제어된 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문은 가까운 미래에 전기자동차가 널리 상용화 되는 경우에 전기자동차 배터리 충전용 부하의 이동성에 의해 전력시스템에서 발생하게 되는 지역별 전송선로 과부하 현상의 해석과 개선에 대해서 다루었다. 과부하 현상 해석을 위해 전력시스템을 부하특성을 기반으로 몇 개의 지역으로 구분하여 전기자동차 충전부하의 이동을 고려한 예상 시나리오를 가정하였다. 전기자동차의 충전용 부하에 의한 지역단위의 부하량 변화를 최대 31%까지 증가하는 경우를 가정하여, 지역별로 특정 선로에서의 과부하현상을 해석하였다.

전기자동차의 이동성 충전부하에 의해 발생하는 선로 과부하현상을 해결하기 위한 방법으로 선로를 포함한 전체 시스템의 설비용량 증설보다는 선로 조류의 직접적인 제어에 큰 효과가 있는 TCSC를 과부하가 발생한 선로에 직렬연결하여 선로의 전송전력을 선로제한치 보다 작은 부하율 100% 이내의 값으로 제어되도록 하였다. 사례연구를 통해서 중부하의 특성을 갖는 모의계통에 전기자동차의 충전부하에 의해 최대 31%의 추가부하가 발생하는 경우에도, 전체 선로 중에서 몇 개 선로에만 TCSC를 설치하여 전송전력의 과부하 현상을 매우 효과적으로 해결할 수 있음을 보였다.

References

- [1] John J. Grainger, William D. Stevenson, Jr., Power system analysis, pp. 329-368, McGraw Hill, 1994.
- [2] S. K. Whang, K. O. Kim, Y. S. Jeong, Fundamental study of corresponding plan of electric vehicle based on demand estimation in the future, The Korea Transport Institute, 2010.
- [3] Paul M. Anderson, A. A. Fouad, Power system control and stability, IEEE Press, 2002.
- [4] R. Mohan Mathur, Rajiv K. Varma, Thyristor-based FACTS controllers for electrical transmission systems, pp. 277-311, Wiley, 2002.
DOI: <https://doi.org/10.1109/9780470546680>
- [5] Power World Simulator manual, Power World Corporation, <http://www.powerworld.com>, 2016.

김 덕 영(Deok Young Kim)

[정회원]



- 1996년 8월 : 고려대학교 대학원 전기공학과 (공학박사)
- 2001년 7월~2002년 8월 : 미국 Georgia Tech. Post-doc. Fellow
- 2008년 7월~2010년 1월 : 미국 University of South Florida 교환 교수
- 1996년 9월~현재 : 군산대학교 전기공학과 교수

<관심분야>

전력계통 안정도, 스마트그리드, 신재생에너지