

Gird Connected Modeling of Primary Frequency Recovery Reserve Provided by Electric Vehicle Considering Characteristics of Electric Vehicle Charge/Discharge Control Integrated Environment

전기자동차 충·방전제어 통합 환경을 고려한 전기차 1차 주파수 회복예비력의 계통연계형 모델링

Kook, Kyung Soo, Lee, Jihoon, Moon, Jonghee, Choi, Wooyeong, Park, Kijun, Jang, Dongsik
국경수, 이지훈, 문종희, 최우영, 박기준, 장동식

Abstract

As the spreading speed of electric vehicles increases rapidly, those are expected to be able to use them as flexible resources in the power system beyond the concern for the supply of its charging power. Especially when the Renewable Energy sources (RES) which have no intrinsic control capability have replaced the synchronous generators more and more, the power system needs to secure the additional frequency control resources to ensure its stability. However, the feasibility of using electric vehicles as the frequency control resources should be analyzed from the perspective of the power system operation and it requires the existing simulation frameworks for the power system. Therefore, this paper proposes the grid connected modeling of the primary frequency control provided by electric vehicles which can be integrated into the existing power system model. In addition, the proposed model is implemented considering technical performances constrained by the characteristics of the Vehicle-Grid Integration (VGI) system so that the simulation results can be accepted by the power utilities operating the power system conservatively.

Keywords: Electrical Vehicle, EV, Vehicle to Grid, V2G, System Frequency Response

1. Introduction

전 세계적으로 전력계통에서 온실가스 배출 감축을 위해 신 재생 발전원의 확충이 적극적으로 추진되고 있다. 국내에서도 '재생에너지 3020 이행계획'에 따라 2030년까지 총 발전량의 20%를 신재생발전원으로 공급하는 것을 목표로 다양한 신재생 발전설비의 보급정책들이 적극적으로 추진되고 있다 [1]. 또한, 국내 전력수급의 기본방향 및 장기전망을 담은 '제9차전력수급기본계획'에서도 2034년까지 전체 발전설비용량 중 40.3%에 해당하는 77.8GW의 신재생발전원을 확보할 예정이다 [2]. 하지만, 기상 조건에 의존 될 수 밖에 없는 신재생발전원은 고유의 주파수응답 성능이 제한되어 전력계통에서의 발전 비중이 높아질수록 전력계통의 주파수제어 성능을 제한할 수 밖에 없어 이를 보상하기 위한 전력계통의 유연성 자원 확보의 중요성이 증가하게 된다.

한편, 전기차는 1회 충전 시 주행 가능거리의 증가 및 배터리의 가격 하락 등 전기차 관련 기술의 향상으로 인해 기존 내연기관 자동차에 대한 경쟁력이 향상되고, 전 세계적으로 보급 확대를 위한 적극적인 지원 정책들이 추진되고 있어 전 세계 전기차 판매량은 2040년까지 5,600만대에 육박할 것으로 전망된다 [3]. 더욱이 전기차는 Vehicle to Grid (V2G) 기술의 발달로 인해 기존의 단순한 운송수단의 개념을 넘어 새로운 에너지원으로 인식되고 있으며, 특히 전기차 배터리의 우수한 제어성과 속응성으로 인해 이를 전력계통 내 유연성 자원으로 활용할 경우 동기발전기 및 전기 저장장치의 응답성능에 준하는 주파수 예비력을 제공할 수 있어 신재생 발전원의 수용율이 높은 전력계통에서 효과적인 유연성 자원의 역할이 기대된다.

다만, 전기차는 기본적으로 운송을 주목적으로 제작 및 운영되기 때문에 이를 V2G기술 기반의 주파수 응답 자원으로 활용하

Article Information

Manuscript Received Mar 19, 2020, Accepted September 27, 2021, Published online December 30, 2021

The Authors are with KEPCO Research Institute, Korea Electric Power Corporation, 105 Munji-ro Yuseong-gu, Daejeon 34056, Republic of Korea.

Correspondence Author: Kook, Kyung Soo (kskook@jbnu.ac.kr)

ORCID: 0000-0002-7537-6514 (Kook, Kyung Soo); ORCID: 0000-0001-6681-7860 (Lee, Jihoon); ORCID: 0000-0002-2982-4009 (Moon, Jonghee);

ORCID: 0000-0001-7537-3897 (Choi, Wooyeong); ORCID: 0000-0002-0206-509X (Park, Kijun); ORCID: 0000-0003-2186-4708 (Jang, Dongsik)



This paper is an open access article licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International Public License.

To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>

This paper, color print of one or more figures in this paper, and/or supplementary information are available at <http://journal.kepco.co.kr>.

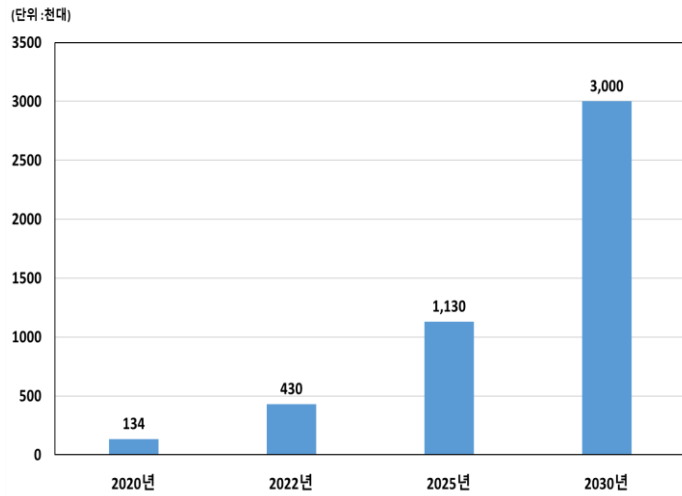


Fig. 1. 연도별 국내 전기차 보급 전망

기 위해서는 전기차 충전장치의 양방향 전력공급 기능과 더불어 추가적인 외부 제어시스템이 필요하다. 이에 따라 전기차의 주파수 응답 제공은 기존의 동기발전원과는 차별된 운전 특성 및 기술적 성능 조건을 고려한 운용방안이 요구되며 전력계통을 대상으로 제공되는 서비스임에 따라 그 적용효과 또한 전력계통을 대상으로 분석되기 위해 기존의 전력계통 모의해석 환경에 통합이 가능한 모델이 필수적이다.

이에 따라, 본 논문에서는 전기차 충전기에 대한 국제표준 IEC 61851의 성능기준, 해외 V2G 실증사례 결과 등을 기준으로 VGI 구축환경을 고려하고, 대규모 전력계통의 모의해석 환경 구축에 가장 널리 사용된 PSS/E (Power System Simulator for Engineering) 프로그램을 기반으로 전기차의 계통연계형 주파수 응답 모델을 제안하고 그 유효성을 분석하였다.

II. 국내 전기차 보급 전망 및 충전시스템 구축환경 분석

A. 국내 전기차 보급 전망

전기차는 1회 충전 주행거리 증가 및 리튬이온 배터리의 가격 하락 등 관련 기술의 향상으로 인해 기존 내연기관 자동차의 대체재로서 자동차 시장 내 점유율을 높여가고 있다. 더욱이, 정부는 '2030 온실가스 감축 로드맵 수정안'에서 설정한 수송부문의 온실가스 감축목표 달성을 위해 2030년까지 300만대의 전기차 보급을 목표로 각종 지원정책 및 충전인프라 구축을 위한 노력을 적극적으로 진행하고 있는 만큼 전기차의 보급은 향후 지속적으로 증가할 전망이다. 국내의 연도별 전기차 보급 전망은 다음 Fig.1과 같다 [3].

B. 전기차 충전시스템 제어 특성 분석

전기차는 운송을 주목적으로 제작 및 운영됨에 따라 이를 계통 내 주파수 안정도 유지를 위한 유연성 자원으로 활용할 경우에는 기대할 수 있는 성능에도 제한이 존재하게 된다. 특히, 전기차 VGI 기술은 ESS와 마찬가지로 배터리를 제어 대상으로 하기 때문에 배터리 기반의 빠른 응답 특성을 활용하여 주파수 제어에 효과적일 것으로 기대된다. 반면 VGI 제어 시스템은 구축 환경에 따라

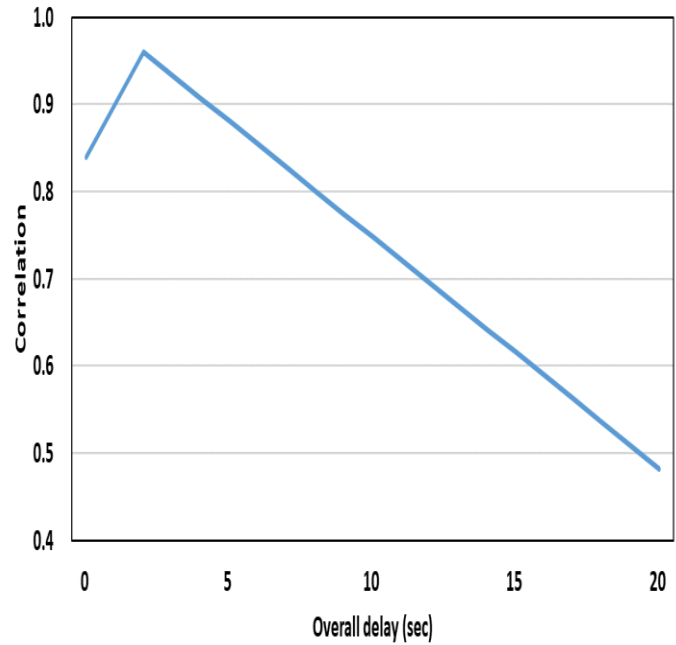


Fig. 2. 주파수 입력과 전기차 출력전류 간의 상관관계 분석 사례

TABLE 1
국내 전력계통 주파수 운영 예비력 운영기준

항목		확보량	응답방법	응동시간	유지시간	
주파수 운영 예비력	주파수 제어예비력	700 MW	AGC+ESS	5분	30분	
	주파수 회복 예비력	1차 예비력	1,000 MW	G/F+ESS	10초	5분
		2차 예비력	1,400 MW	AGC	10분	30분
		3차 예비력	1,400 MW	수동급전	30분	-
소계		4,500 MW				

TABLE 2
발전기 및 전기저장장치의 속도조정률

	수력 및 내연발전기	가스터빈 발전기	기력발전기	전기저장장치
속도조정률	3~4%	4~5%	5~6%	2% 이내

통신 및 응답 특성에 시간 지연이 발생할 수 있어 전력계통의 주파수 측정과 V2G를 통해 최종적으로 제공되는 전기차 주파수 응답 간에 시간 지연이 발생할 수 있다.

Fig. 2은 실제통에 주파수 응답 모델을 연계하여 측정된 주파수 입력과 V2G 응답 전류간의 상관관계를 시간 지연의 정도에 따라 Pearson product-moment (PPM) 상관계수로 표현한 것으로서, 분석 결과 시간 지연이 2초일 때 가장 큰 상관계수가 도출되었다 [5]. 이는 전기를 전력계통 내 주파수 응답 자원으로 활용하는 경우 2초 수준의 시간 지연이 발생할 수 있음을 의미한다.

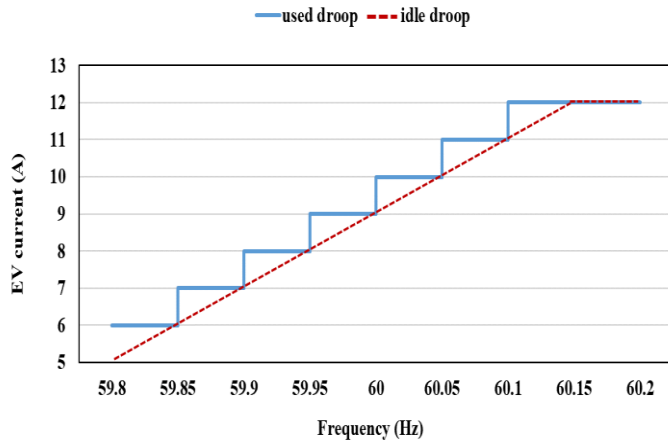


Fig. 3. 국제 표준 IEC 61851-1을 적용한 실제 출력 전류 예시

또한, 전기차의 주파수 응답 시 제어 성능은 충전기의 동작 특성에 의해서도 제한될 수 있다. 즉, 국제표준 IEC 61851-1의 경우 전기차 충전 시 탑재형 AC 충전기의 충전전류 하한값을 6A로 규정하고 있으며 [6], 이로 인해 특정 전류 운영 범위 내에서 주파수 응답의 출력 범위가 한정될 수 있다. 또한, 전기차 충전 시 출력 전류의 제어정밀도를 1A단위로 요구함에 따라 제작된 충전기를 사용할 경우 전기차의 주파수 응답 시 Fig. 3과 같이 계단 모양의 불연속적인 출력 특성이 나타나게 된다 [7].

III. 전기차의 1차 주파수 회복예비력 제공 모델링

A. 국내 전력계통 주파수 운영 예비력 운영체계

전력계통은 전력 수요의 변동 및 발전기 고장 등에 의한 수급 불균형 시에도 안정적으로 운영될 수 있어야 한다. 이를 위해 국내 전력계통에서는 예비력 운영체계에 따라 발전기로부터 예비력을 확보하고 있으며, 다음 Table 1과 같이 주파수 운영예비력을 주파수 제어예비력과 주파수 회복예비력으로 구분하여 운영 중에 있다 [8].

이중에서도 주파수 회복예비력은 전력계통 내 발전기 탈락 등의 외란이 발생한 경우 계통 주파수 회복을 위해 확보되는 예비력으로써, 사용목적 및 기술 요건에 따라 1차, 2차 및 3차 주파수 회복예비력으로 구분된다. 이 중 외란 이후 가장 빠른 시간 내에 응답하는 1차 주파수 회복예비력의 경우 발전기의 조속기 및 전기 저장장치의 주파수 응답을 통해 10초 이내에 응답하여 5분 이상 출력을 유지할 수 있어야 한다.

이때, 1차 주파수 회복예비력은 발전원별로 사전에 신고한 속도조정률(R)에 따라 계통 주파수 편차(Δf)에 비례하여 다음 식 (1)과 같이 주파수 응답(ΔP)을 제공한다. 이때 P_{rated} 은 발전설비의 정격을 의미하며, f_{rate} 는 전력계통의 공칭주파수를 의미한다. 주파수 응답에 영향을 주는 발전원별 속도조정률은 국내 전력계통 신뢰도 고시에 따라 특정 범위 이내로 유지하도록 요구되며, 이는 다음 Table 2와 같다

$$\Delta P = \frac{P_{rated}}{R} \times \frac{\Delta f}{f_{rate}} \quad (1)$$

특히, 전기저장장치의 경우 2% 이내의 속도조정률이 요구되는데, 전기차의 배터리 또한 전기저장장치와 동일한 서비스를 제공하는 전력자원으로 활용될 경우 빠른 응답특성에 기인하여 우수한 주파수 응답 제공이 가능할 것으로 판단된다. 향후 대규모 보급이 전망되는 전기차를 통합하여 대용량의 유연성 자원으로 활용할 경우, 주파수 예비력의 신규 자원으로써 계통 운영 시 주파수 안정도에 기여하는 바가 클 것으로 기대된다.

B. 전기차의 1차 주파수 회복예비력 제공을 위한 알고리즘

운송수단이 주목적인 전기차를 전력계통 내 유연성 자원으로 활용하는 경우 충전시스템 구축환경에 의한 기술적 제약요소가 발생할 수 있으며, 더욱이 주파수 응답 수행과 전기차 충전 확보 간의 적절한 균형이 요구됨에 따라 기존의 동기발전원 및 전기저장장치와는 차별화된 제어 방안이 필요하다.

본 연구를 통해 제안된 전기차의 주파수 응답 제어 전략은 충전 중인 전기차의 충전 전력 및 전기차배터리의 잉여전력을 활용한 방전 제어 수행을 통해 1차 주파수 응답을 제공하도록 하며, 전기차 충전 상태 확보뿐만 아니라 전력계통의 주파수 변동에도 효과적으로 대응하도록 전력계통의 주파수 상태를 기준으로 충전 제어 모드와 방전 제어 모드로 구분하여 제안되었다. 이때 제어 모드별 동작 영역은 국내 전력계통의 주파수 운영 범위 기준인 60 ± 0.2 [Hz]를 참고하여 구분토록 하였고 주파수 응답을 제공하는 전기차는 사전에 충분한 SoC를 확보해둔 상태라고 가정하며, 전기차 사용자의 충전 패턴은 고려되지 않았다.

먼저, 충전 제어 모드는 주파수가 계통운영 범위 이내로 유지되는 경우, 전기차는 전력계통의 상황에 따라 충전 전력만을 조정하는 V1G 형태로 주파수 응답에 기여하면서 동시에 전기차 사용자의 배터리 부담을 최소화하도록 한다. 이때, 충전전력은 다음 식 (2)와 같이 사전에 설정한 부동대 및 주파수 운영 범위를 기준으로 제어구간을 분리하여 운영하도록 한다. 전력계통 내 수급 불균형으로 인해 계통 주파수가 부동대 범위를 벗어날 경우 기존 충전 수요(P_0)로부터 주파수 편차에 따라 충전량을 증감하는 방식으로 주파수 응답을 제공하게 된다. 다만, 과주파수 시에도 주파수 응답에 기여할 수 있도록 부동대 범위 내에서는 충전 전력에 여유를 두어 정격보다 낮은 수준으로 충전을 수행한다.

$$P_{V1G} = \begin{cases} P_0 - \frac{P_{rated}}{R} \times \frac{(f_{ab,low} - f)}{f_{rated}}, & 59.8\text{Hz} < f < f_{ab,low} \\ P_0, & f \leq f_{ab} \\ P_0 + \frac{P_{rated}}{R} \times \frac{(f - f_{ab,high})}{f_{rated}}, & f_{ab,high} < f < 60.2\text{Hz} \\ P_{rated}, & f \geq 60.2\text{Hz} \end{cases} \quad (2)$$

다음으로 방전 제어 모드는 전력계통에서 발전기 고장 등의 외란으로 인해 과도한 주파수 하락이 발생하여 운영 범위를 초과하는 경우 전기차 배터리 내 확보된 전력을 기반으로 주파수 변동에 따라 전력을 방전하는 V2G 방식으로 주파수 응답을 제공한다.

식 (3)과 같이 계통 주파수가 59.8[Hz] 이하로 하락하는 경우 기존의 충전수요를 회수하고 설비의 제어 성능에 의해 제한될 수 있는 최소 방전량(P_{min})으로부터 계통의 주파수 상황에 따라 방전전력을 제어함으로써 충전 제어모드와 비교하여 보다 적극적으로 주파수 안정도에 기여할 수 있다.

$$P_{V2G} = \begin{cases} P_{min} + \frac{P_{rated}}{R} \times \frac{(59.8 - f)}{f_{rated}}, & f_{min} < f \leq 59.8\text{Hz} \\ P_{rated}, & f \leq f_{min} \end{cases} \quad (3)$$

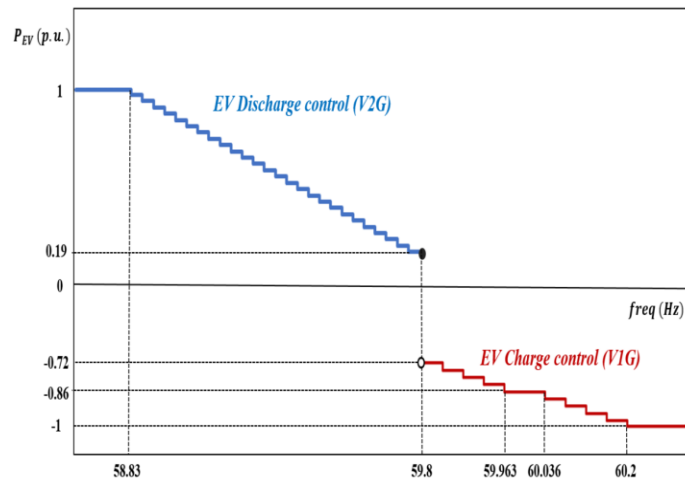


Fig. 4. 전기차 기반 주파수 응답 제어 곡선

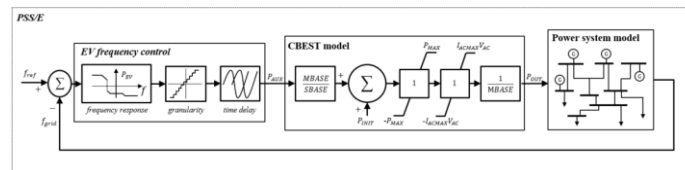


Fig. 5. 전기차의 주파수 응답 성능 모델링 개요

위의 운전조건별 제어 전략과 충전시스템 구축환경에 의한 기술적 제약조건을 반영하여 국내 7kW 완속충전기를 대상으로 주파수 응답 제어 곡선을 도출하였으며, 이는 다음 Fig. 4와 같다. 이때, 충·방전 제어 시 공통적으로 국내 전기저장장치에 요구하고 있는 2%의 속도조정률을 준용하였으며, 충전기의 표준에 적용된 1A 단위의 제어정밀도를 반영하여 불연속적인 출력특성이 나타나게 된다. 최소 방전 전력은 충전기 자체의 기술적 사양 특성을 반영하여 최소 전류 6A로부터 환산된 값인 0.19p.u.를 적용하였다. 이때, 부동대 영역 내에서의 충전전류는 부동대 및 주파수 운영범위 상한값간의 주파수 편차인 0.164Hz와 2%의 속도조정률을 기반으로 도출된 값인 0.86p.u.를 적용하였다.

C. 전기차 1차 주파수 회복예비력 모델링

본 논문에서 제안한 전기차 주파수 응답 모델은 기존 전력계통 모델과의 호환성을 위해 대규모 전력계통 해석프로그램인 PSS/E (Power System Simulator for Engineering)를 기반으로 구현되었다. 또한, 제안된 주파수 제어 알고리즘의 유연한 적용과 전기차 배터리의 동특성을 반영하기 위해 PSS/E 내 전기저장장치 모델인 CBEST를 기반으로 사용자 정의 모델을 구축하였으며 [9], 이는 다음 fig.5와 같다.

즉, 제안한 전기차의 계통연계형 주파수 응답 모델은 전력계통 내 부하 모션에 연계되어, 모션별로 측정된 주파수와 제안된 알고리즘에 의해 속도조정을 기반의 출력 요구량을 산정하고 1[A]의 제어정밀도와 2초의 시간 지연이 반영된 최종적인 제어 요구량을 CBEST 모델의 입력(P_{AUX})으로 적용한다. 이후 전기차의 초기 충전량(P_{INIT})과 주파수 응답 모델의 가용용량(P_{MAX})을 고려하여 최종적인 주파수 응답량(P_{OUT})이 전력계통 모델에 입력된다.

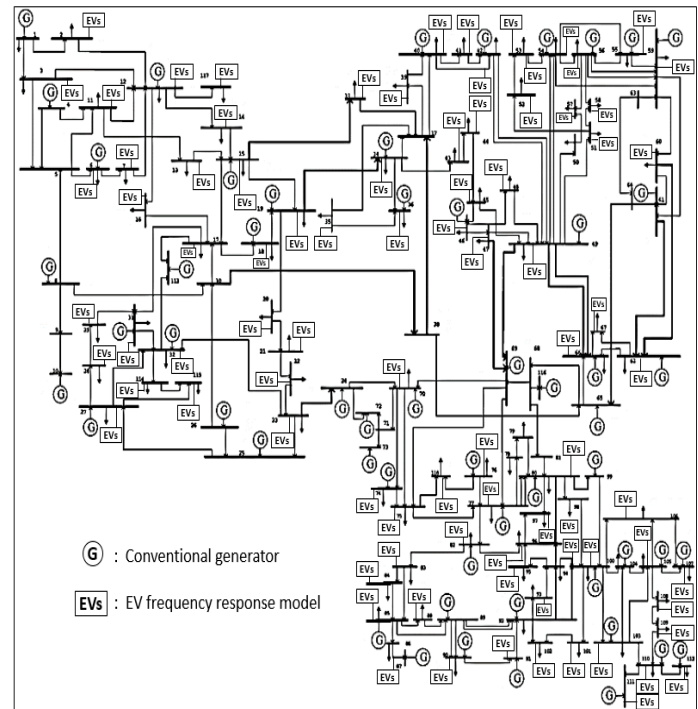


Fig. 6. IEEE 118 계통도 및 전기차 연계 모델링

III. 사례연구

A. 시험계통 및 전기차 보급 모델링

본 절에서는 IEEE 118 계통을 대상으로 제안된 전기차의 1차 주파수 응답 모델의 시뮬레이션을 진행하여 모델의 유효성을 확인하였다. IEEE 118 계통은 총 19대의 발전기로 구성되며 총 설비용량은 약 4.5GW 이고 전력수요는 3.8GW이다. 또한 운영예비력은 0.2Hz의 주파수 편차를 기준으로 총 400 MW가 적용되었다. IEEE 118 계통의 계통구성도는 다음 fig.6과 같다 [10]. 이때 각 부하 모션에 본 논문에서 제안한 전기차 주파수 응답 모델을 연계하여 추가하였다.

또한, 시험계통에 연계된 전기차 대수($n_{EV,k}$)는 다음 식 (2)를 통해 해당 모션의 전기 수용가 수(N_k)를 기준으로 가구당 자동차 보유 대수($p_{vehicle}$), 전기차 보급률(p_{EV}) 및 동시충전비율($p_{plug-in}$)을 반영하여 산정할 수 있다. 가구당 자동차 보유 대수($p_{vehicle}$)는 통계청에서 발표한 '2017 한국의 사회지표'를 참고하여 국내 한 가구당 자가용 보유 대수인 0.88대를 적용하였으며 [11], 전기차 보급률(p_{EV}) 및 동시충전비율($p_{plug-in}$)은 각각 10%, 30%로 가정하였다.

$$n_{EV,k} = N_k \times p_{vehicle} \times p_{EV} \times p_{plug-in} \quad (2)$$

모션별 전기수용가수는 미지의 값이나 대략적으로 전력 수요에 비례하기 때문에 해당 모션의 전력수요와 동시율 (coincidence factor)등을 고려하여 다음 식 (3)과 같이 산출 가능하다 [11]. 이때 CF 는 동시율로서 개별 최대 부하가 동시에 발생하는 정도를 나타내는 인수이고, pf 는 전력계통의 역률이다. $P_{ct,j}$ 전기 수용가의 계약전력으로서 3kW를 적용하였으며, 전력계통에서 사용 가능한 최대 전력은 일반적으로 10%의 여유를 가지므로 1.1 배를 계약전력에 적용하였다.

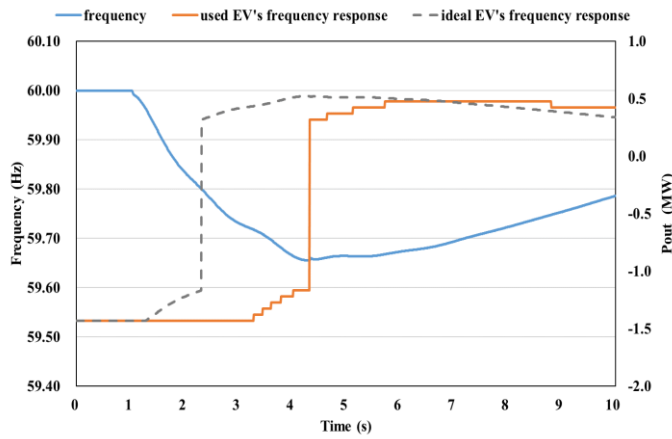


Fig. 7. 전기차 주파수 응답 알고리즘의 동작 확인 결과

TABLE 3
전기차 주파수 응답 성능 평가를 위한 시나리오

시나리오	발전기 고장 규모	전기차의 주파수 응답		동기발전원의 1차 주파수 회복예비력
		가용 용량	응답	
A	607 MW	0		400 MW
B	607 MW	108.3 MW		400 MW
C	607 MW	108.3 MW		325 MW

$$N_k = \frac{S_{max,k}}{CF \times pf \times P_{ct,j} \times 1.1} \quad (3)$$

이 경우, 전기차 주파수 응답 모델의 가용용량($P_{MAX,k}$)은 해당 모선에 연계된 전기차 대수($n_{EV,k}$)와 충전기의 정격용량(P_{rated})에 비례하며, 다음 식 (3)과 같이 계산할 수 있다. 이때, 충전기의 정격용량(P_{rated})은 국내 완속충전기의 설비정격을 고려하여 7kW 로 설정하였다. 식 (2)와 식(4)를 기반으로 도출된 시험계통 내 총 전기차 대수 및 주파수 응답 모델의 가용용량은 각각 15,470 대, 108.3MW 이다.

$$P_{MAX,k} = \sum_{k=1}^N n_{EV,k} \times P_{rated} \quad (4)$$

B. 계통연계 모델검증

본 절에서는 제안된 1차 주파수 회복예비력 제공 알고리즘의 동작 검증을 위해 607MW 규모의 최대 단위용량 발전기의 탈락을 모의하고, 임의의 전기차 주파수 제어 모델 1대의 출력 특성을 분석하였으며 이는 다음 Fig. 7과 같다.

전기차 충전시스템 구축환경에 의한 기술적 제약조건이 반영되지 않은 이상적인 주파수 응답은 회색 점선으로써, 연속적인 출력 특성을 가진 형태로 주파수 응답이 제공됨을 확인할 수 있다. 다만, 전기차의 1차 주파수 회복예비력 모델의 출력은 주황색 실선으로 나타났으며, 이는 기술적 제약조건인 2초의 시간 지연과 불연속적 출력 제어를 확인할 수 있다.

또한, 본 논문에서 제안한 전기차의 주파수 응답 성능을 평가하기 위해 아래 Table 3과 같이 전기차의 주파수 응답 제공 여부 및 동기발전기의 1차 회복예비력의 증감에 따라 다양한 시나리오를 가정하여 모의해석을 진행하였으며, 그 결과는 Fig. 8과 같다.

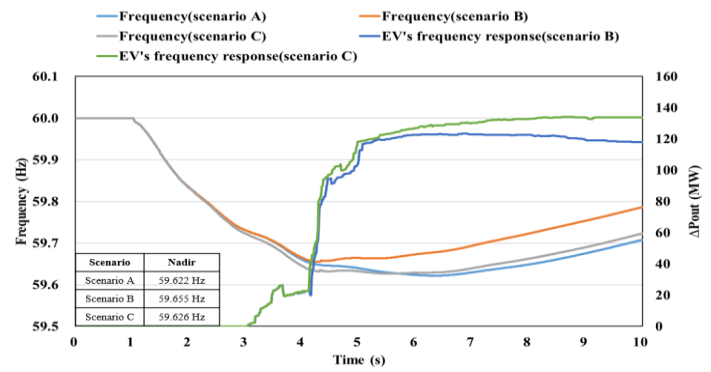


Fig. 8. 전기차의 주파수 응답에 따른 최소 과도 주파수 개선 효과

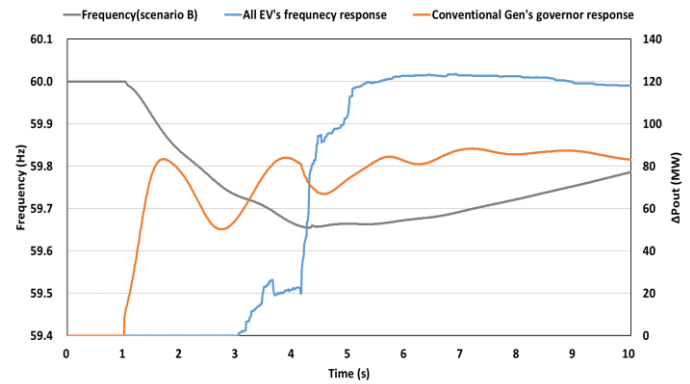


Fig. 9. 전기차의 주파수 응답과 조속기 응답의 출력 변동량 비교

즉, 시나리오 A는 외란 이후 계통 주파수를 회복하기 위해 사전에 확보해 둔 동기발전기의 조속기 응답에만 의존하는 반면, 시나리오 B의 경우 전기차가 확보한 1차 주파수 회복예비력을 추가적으로 제공함으로써 최소 과도 주파수가 59.622 Hz에서 59.655 Hz로 상승함을 확인할 수 있다. 반면, 시나리오 C에서는 시나리오 B와 동일한 수준만큼 전기차의 주파수 응답을 제공하되 동기발전원의 1차 주파수 회복예비력을 약 75 MW만큼 경감한 경우로서, 이때 시나리오 A와 비슷한 수준의 최소 과도 주파수가 도출되었다. 이는 전기차를 통해 주파수 응답을 제공함으로써 조속기에 의한 75 MW 수준의 1차 회복예비력을 대체할 수 있음을 의미한다.

전기차의 1차 주파수 회복예비력 제공 효과에 관한 상세 분석을 위해 시나리오 B를 기준으로, 전기차의 주파수 응답과 시나리오 C에서 경감된 동기발전기의 1차 주파수 응답 출력을 비교 하였으며, 이는 Fig. 9과 같다.

즉, 발전기의 조속기 응답의 경우, 외란 직후 계통 주파수가 59.8 Hz 이하로 감소함에 따라 90 MW 수준까지 출력량을 증가시켜 주파수 응답을 제공한다. 반면 전기차의 경우 외란 초기에는 충전량만을 감소시켜 주파수 응답을 제공하지만, 주파수 하락이 일정 수준 이상이 됨에 따라 약 4초 이후에는 전기차가 기존의 충전 수요를 회수함과 동시에 방전으로 전환되어 최대 123.4 MW수준의 주파수 응답을 제공하는 것을 확인할 수 있다. 이는 전기차 자체가 주파수 제어만을 목적으로 운영되는 자원이 아니기 때문에, 제안된 전기차의 1차 주파수 회복예비력 제공 알고리즘에서는 주파수 하락이 작을 경우 충전 전력의 제어로만 주파수 응답을 제공하여 기

존 발전기의 조속기 응답에 비해 제어성능이 다소 적을 수 있다. 하지만, 주파수 하락이 일정 수준 이상이 될 경우에는 순간적으로 충전에서 방전으로 전환되어 발전기의 조속기 응답보다 주파수 회복에 더 효과적으로 기여할 수 있다.

IV. CONCLUSION

본 논문에서는 전기차를 전력계통의 주파수 응답 제공자원으로 활용할 경우 고려해야 하는 기술적 제약 조건과 국내 전력시장 운영 규칙 등을 참고하여 속도조정률 기반 주파수 응답 제어 알고리즘을 제안하고 이에 대한 계통연계형 모델링을 구축 하였다. 이를 위해 시험계통의 모션별로 산출된 전기차의 V2G 가용 용량을 고려하여 전기차의 주파수 응답 모델을 연계하고 발전기의 조속기 응답과의 비교를 통해 성능을 분석하였다. 사례연구를 통해, 전력계통의 주파수 하락이 작을 경우 전기차의 주파수응답은 충전 전력의 제어로만 제공되어 기존 발전기의 조속기 응답에 비해 제어 성능이 다소 낮을 수 있지만 주파수 하락이 일정 수준 이상이 될 경우에는 순간적으로 충전에서 방전으로 전환되어 발전기의 조속기 응답보다 주파수 회복에 더 효과적으로 기여할 수 있음을 확인 하였다. 이는 운송이 주목적인 전기차를 전력계통에서 유연성 자원으로 활용하는 경우, 동일한 서비스를 제공하는 기존 자원과는 다를 수 밖에 없는 제어 알고리즘과 충전시스템 구축환경에 기인된 것으로 사료된다. 향후 전기차의 대규모 보급에 따라 이를 통합하여 전력계통의 대용량 유연성 자원으로 활용할 경우 신재생 발전원의 수용율이 높아지는 전력계통의 안정적 운영에 크게 기여할 수 있을 것으로 판단된다. 다만, 본 연구에서는 전기차 주파수 응답 모델의 구축 및 시뮬레이션 시 VGI에서 다루어져야 하는 성능 중 대표적인 제약만 고려됨에 따라, 보다 정확한 주파수 응답 모델을 기반으로 VGI의 계통적용 효과를 검토하기 위해서는 향후 VGI 실험 데이터 및 전기차 사용자의 충전 패턴 등을 반영한 후속 연구가 필요할 것으로 판단된다.

ACKNOWLEDGEMENT

This research was supported by Korea Electric Power Corporation.(Grant number : R20X003-05)

REFERENCES

- [1] Ministry of Trade, Industry and Energy, Republic of Korea., "Renewable Energy 3020 plan," Dec., 2017
- [2] Ministry of Environment, Republic of Korea., "The 2nd Basic Plan for Climate Change Response," Oct., 2019
- [3] BloombergNEF, "Electric Vehicle outlook 2019," May., 2019
- [4] Kijun Park, Chan Son, "Electric Vehicle-Grid Integration and V2G Technology Outlook," AUTO JOURNAL : Journal of the Korean Society of Automotive Engineers, 32-36, Dec., 2019
- [5] K. Knezović, S. Martinenas, P. B. Andersen, A. Zecchino and M. Marinelli, "Enhancing the Role of Electric Vehicles in the Power Grid: Field Validation of Multiple Ancillary Services," IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol. 3, no. 1, pp. 201-209, Oct., 2016,10.1109/TTE.2016.2616864.
- [6] Electric vehicle conductive charging system - Part 1: General requirements, IEC 61851-1:2017, 2017.
- [7] A. Zecchino, S. D'Arco, A. G. Endegnanew, M. Korpås and M. Marinelli, "Enhanced primary frequency control from EVs: a fleet management strategy to mitigate effects of response discreteness," IET Smart Grid, vol. 2, no. 3, pp. 436-444, Apr., 2019, 10.1049/iet-stg.2018.0274 www.ietdl.org
- [8] Koear Power Exchange (KPX), "Korean electricity market rule," Dec., 2019
- [9] SIMENS PTI, "PSSE 34 MODEL LIBRARY," Mar., 2015.
- [10] IIT, "Index of data Illinois Institute of Technology," Illinois Inst. Technol., Chicago, IL, USA, [Online]. Available: <http://motor.ece.iit.edu/data/>
- [11] Hyeok Jin Son, Kyung Soo Kook, "Stochastic Modeling of Plug-in Electric Vehicle Distribution in Power Systems," Journal of Electrical Engineering and Technology, vol.8, no.6, pp. 1276-1282, Aug., 2013, <http://dx.doi.org/10.5370/JEET.2013.8.6.1276>