

전기차 충전부하에 의한 배전 변압기의 부하율, 핫스팟 온도, 열화, 수명 분석

(Analysis of Load Factor, Hot Spot Temperature, Thermal Aging, and Residual Life of Distribution Transformer with Electric Vehicle Charging Load)

임동영* · 배성우**

(Dong-Young Lim · Sungwoo Bae)

Abstract

This paper presents the effects of electric vehicle (EV) charging load on aging and life of loss (LOL) of a distribution transformer to provide useful information for enabling high-penetration EV to the utility grid. In order to analyze the effects, the prediction of EV charging demand was performed based on statistical data relating to EVs in Jeju and charging scenarios reflecting regional characteristics of Jeju. The actual data provided by KEPCO were used to the distribution transformer loads. The effects of the distribution transformer including load factor, hot spot temperature, aging, and LOL were analyzed according to EV penetration levels. The aging and LOL of the transformer due to EV charging load were evaluated based on IEEE C57.91-1995 and rose exponentially with the increment of the EV penetration level. It is analyzed that the rate of the transformer life reduction is higher than that of EV penetration increment in the charging pattern which performs the frequent-fast charging with the increase of EV penetration level. The results of this paper suggest that it is essential to examine the capacity, aging, and remaining lifetime of power equipment in distribution system, as well as accurate prediction of EV charging demand corresponding to power demand and supply for the high-penetration EV.

Key Words : Charging demand, Distribution transformer, Electric vehicle, Hot spot temperature, Transformer Aging

* Main author : Postdoc of Electrical Engineering at Hanyang University
** Corresponding author : Professor of Electrical Engineering at Hanyang University
Tel : 02-2220-0379, Fax : 02-2220-1886
E-mail : dylim@hanyang.ac.kr
Received : 2018. 6. 25.
Accepted : 2018. 7. 24.

1. 서 론

전기차의 친환경성(배기가스 방출 감소)과 에너지 절약(화석연료의 사용 감소)의 장점으로 인해, 그 수요와 보급이 지속적으로 상승하고 있다. 정부의 정책이 에너지 절감과 친환경적인 발달을 추구하기 때문

에, 전기차의 보급은 미래에 급속하게 증대할 것이다. 하지만 이러한 증대는 양면성을 가지고 있기도 하다. 친환경적 기술도입과 화석연료에 의존성 탈피로부터 지속가능한 발전이 부각 되지만, 전력계통에서 새로운 과제와 문제를 야기하기도 한다.

전기차의 충전은 계통으로부터 전력을 요구하기 때문에, 전력계통의 안정성 저해 없이 기존 부하와 함께 전기차의 높은 보급률을 수용하는 것은 매우 도전적인 과제이다. 특히 현재보다 상당히 크게 전기차 보급률이 증가하고, 전기차 충전이 동시, 일제, 빈번, 불규칙적으로 반복될 때, 그 전기차의 수용성을 가능하게 하는 전력계통의 구성은 더욱더 어렵다. 전기차 충전이 동시, 일제히 수행 및 탈락되는 경우에, 배전계통의 과부하, 전압, 주파수 변동의 문제가 우려된다. 그리고 불규칙적인 전기차 충전은 전력계통의 전력수급 문제를 유발할 수 있다. 따라서 전력계통 측면에서 전기차 보급의 확대에 의한 문제는 전력수급과 계통의 악영향(과부하, 전압과 주파수 변동 등)과 관련된다.

전기차 충전부하로 인한 전력수급과 계통의 악영향은 각각 전기차 충전전력을 높은 신뢰성으로 추정하는 것과 충전부하에 따른 전력설비의 과부하, 계통의 전압과 주파수 변동, 계통의 증설보강 등을 분석하는 것이 필요하다. 이러한 연구들은 현재까지 전기차 확대 보급을 위해 활발히 연구되고 있다. 전기차 충전전력은 충전 시나리오별 예측[1], 수학적 모델(fluid dynamic traffic)을 이용한 시공간적 예측[2], Shared Nearest Neighbor 알고리즘 이용한 추정[3], 기후 데이터와 교통량 데이터를 이용한 빅데이터 기법에 기반한 추정[4] 등 다양한 예측기법으로 추정 및 예측되고 있다. 그리고 충전부하로 인한 전력계통에서 영향은 계통 전압의 변동[1,5], 변압기의 과부하와 열화[6-8], 배터리 SOC에 따른 변압기 수명[9], 실제 변압기 온도추정에 기반한 충전 시나리오 효과의 실험적 입증[10]에 관한 연구로 보고되고 있다. [1-10]의 결과들로부터, 전기차 충전전력의 예측방법과 충전부하에 대한 계통 영향의 결과는 효과적으로 파악할 수 있다. 하지만 그 결과들이 국내 지역과 특정한 지역에 전기차 보급 확대를 위해, 유용하게 적용할 수 있는지는 불확실하다. 이는 국내 및 특정 지역에서 전기차 충전거

동과 전력소모 경향이 [1-10]에서 상정한 상황과 상이할 수도 있기 때문이다. 전기차 충전거동과 전력수요 경향은 각각 개인적 성향과 지역적 특색이 반영되므로, 그 지역에 실제 데이터(전기차 관련 통계 데이터, 계통 데이터, 부하 데이터)를 적용한 연구가 필수적이다. 그 실제 데이터를 이용한 전기차 충전부하의 예측 결과와 계통영향의 결과는 더욱더 유용하게 적용 및 활용할 수 있을 것이다.

본 논문은 국내 제주지역의 전기차 보급 확대에 대응하기 위한 유용한 데이터를 제공할 목적으로, 실제 데이터에 기반한 전기차 충전부하에 대한 배전 변압기의 영향을 분석하였다. 배전 변압기의 영향은 세부적으로 부하율, 핫스팟 온도, 열화, 수명의 감소이며, 전기차 보급률에 따라 평가 및 분석되었다. 전기차 충전부하의 모델링은 전기차와 종래의 자동차에 관한 실제 통계 데이터(보급률, 이동거리, 보급 모델, 교통량, 운전경향)를 적용하여 수행하였다. 충전 시나리오는 제주도 북부 지역의 교통량 경향과 제주 지역의 관광특성을 반영하였다. 그리고 충전부하에 대한 변압기 영향 분석에서, 실제 데이터는 배전 변압기의 부하와 정격용량이 활용되었다.

2. 변압기 열화 추정방법

본 논문에서, 전기차 충전부하에 의한 변압기 열화 추정은 1) 변압기 선정, 2) 전기차 충전부하 모델링, 3) 충전 시나리오 설정, 4) 충전부하에 의한 변압기 열화 추정의 절차로 수행되었다. 본 항은 이를 상세히 설명한다.

2.1 변압기 선정

변압기는 설치 위치와 실제 일부하곡선 데이터의 취득여부를 기준으로 선정하였다. 고려한 변압기 위치는 전기차 충전이 수행되는 부하측에 인접한 지역이다. 이에 부합하는 변압기는 주상변압기나 자가용 수용가에 설치된 변압기이다. 하지만 그 변압기들에 대한 실제 일부하 곡선 데이터는 공공기관에서 제공받거나, 신뢰성 있는 데이터를 취득하기 어렵다. 그래서

배전 변전소에 설치된 변압기가 본 논문에서 선정되었다. 선정된 변압기는 제주 북부지역의 인화선 배전 변전소에 설치된 것이다. 인화선의 개략적인 단선도는 그림 1과 같다. 그림 1에서 선정된 변압기는 Main Tr.이며, 정격용량 45 MVA로 일도 1, 2동, 이도 1, 2동, 아래동의 부하를 지원한다. 그리고 선정된 변압기의 실제 일부하곡선 데이터는 한국전력에서 제공한 데이터로 18년 1월 15일의 일부하 데이터를 적용하였다.

2.2 전기차 충전부하 모델링

전기차 충전부하는 제주지역 통계데이터를 적용하여 산정하였다. 충전부하전력은 식 (1)로 계산하였다.

$$P_{EV} = \alpha \times \beta \times \gamma \times P_{cha} \quad (1)$$

식 (1)에서 P_{EV} 는 전기차 충전부하전력 [kW], α 와 β 는 각각 현재 제주도의 전기차 보급률, 선정된 변압기가 담당하는 제주 북부지역의 세대수이다. β 는 실제 통계 데이터의 50%를 적용하였는데, 이는 선정된 변압기가 해당지역의 모든 세대의 부하를 담당하지 않기 때문이다. 그리고 γ 는 제주도의 세대당 차량등록대수, P_{cha} 는 충전 시 충전전력 [kW]이다. α 는 0.028(18년 4월 기준)[11], β 는 25,039(선정된 지역의 세대 수는 17년 12월 31일 기준 50,078[12]이나 이 값의 50% 적용), γ 는 1.33[12], P_{cha} 는 완속과 급속충전에 대하여 각각 7, 50kW이다. 식 (1)에 의한 전기차 충전부하는 후술하는 제주지역의 특성과 전기차 이용현황에 대한 통계데이터를 기반으로 설정된 충전 시나리오를 반영하여 산출된다.

2.3 충전 시나리오의 설정

전기차 충전 시나리오는 충전시작시간, 충전 이전에 배터리 충전량 (state of charge, SOC), 충전패턴을 고려하여 결정하였다. 여기서 충전 시나리오 결정을 위한 그 요소들이 상세히 설명된다.

충전시작시간은 고려된 제주 북부지역의 교통량을

기준으로 결정하였다. 적용된 교통량은 제주 북부 지역의 yeonsam-ro 상행선에 대한 것이다. 이 도로는 그림 1의 인화선이 경유하는 경로에 포함된다. yeonsam-ro 상행선에서 시간에 따른 교통량 패턴은 제주교통정보센터 [13]의 정보를 이용하여 그림 2에 나타내었다. 그림 2에서 교통량의 피크는 출근시간(07:00~09:00)과 퇴근시간(17:00~18:00)에 출현한다. 전기차 충전은 그 피크시간 이후에 수행될 것으로 예상된다. 그러므로 충전시작시간은 출근 후 직장에서 10:00, 퇴근 후 가정에서 18:00로 상정하였다. 그 충전시간에 더하여, 점심시간(12:00)과 일과의 종료시간(22:00)에 전기차 충전이 추가된다. 이 충전은 관광객에 의해 초래되는 것으로 제주 지역의 특성을 반영한 것이다.

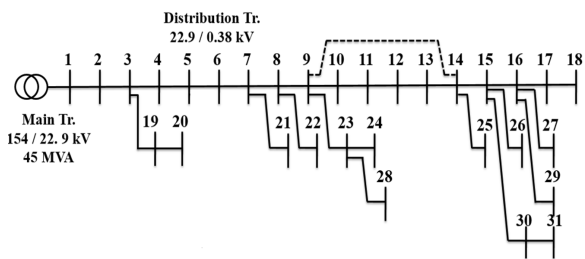


Fig. 1. Single line diagram of Inhwa distribution line in north JEJU region

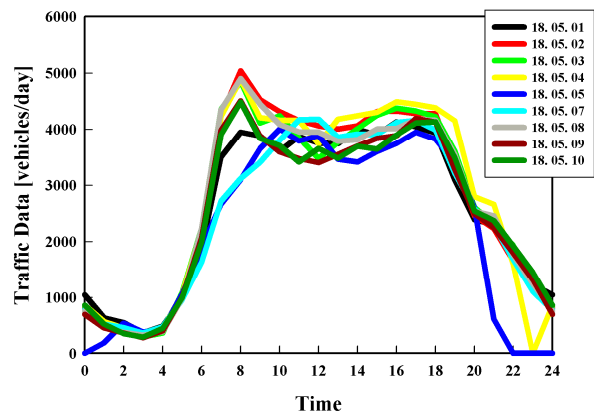


Fig. 2. Traffic volume on yeonsam-ro in north Jeju [13]

충전시작시간에서 전기차가 충전해야할 전력은 충전 직전의 SOC에 의해 추정된다. 충전 직전의 SOC는 식 (2)를 이용하여 추산된다.

$$SOC = (1 - \frac{d_i}{d_M}) \times 100 \quad (2)$$

식 (2)에서 d_i 과 d_M 은 각각 충전 후 주행한 거리 [km]와 완전히 충전된 배터리의 최대주행거리 [km]이다. d_M 은 전기차 모델에 의해 결정되며, 본 연구에서 아이오닉 전기차 모델을 적용하였다. 이는 18년 4월 기준으로 제주도에 보급된 전기차 모델 중 보급률 (50%)이 가장 높기 때문이다[11]. 배터리가 완전히 충전되었을 때, 이상적인 주행거리는 아이오닉 모델에서 190km이다. 하지만 실제 주행거리는 제조사에서 제시한 190km 이하일 것으로 추정되기 때문에, d_M 은 170km로 상정하였다. 아이오닉 모델의 배터리 용량은 28kWh이다.

충전 직전에 SOC는 충전패턴(충전시기)과 주행한 거리에 의존한다. 충전패턴은 그림 2의 교통량 데이터와 제주지역 특성을 기반으로 출근 후 직장에서 충전, 퇴근 후 가정에서 충전, 관광객에 의한 충전으로 상정하였다. 출근 후 직장에서 전기차가 충전될 때, SOC는 84.4%와 50%로 결정하였다. 제주지역에서 하루 동안 평균 주행거리는 52.88km이다[14]. 본 연구에서 출근 시 주행거리는 그 평균 주행거리의 절반(26.44km)을 이동한 것으로 상정하였다. 이 경우에 SOC는 식 (2)에 의해 84.4%로 계산된다. 50%의 SOC는 전기차 사용자가 출근 전에 충전을 수행하지 않았거나 완전한 충전이 이루어지지 않은 경우를 반영한 것이다. 퇴근 후 전기차가 충전되는 경우에, SOC는 68.9%와 30%로 결정하였다. 68.9%의 SOC는 상술한 조건으로 출·퇴근에만 전기차를 이용한 경우이다. 그리고 전기차가 출근 후 출장업무나 개인 업무에 사용되거나, 퇴근 후 개인 활동을 위한 이동에 전기차가 이용되는 경우를 고려할 수 있다. 이러한 경우에 SOC는 30%로 상정하였다. 언급한 2가지 충전패턴(직장에서 충전, 가정에서 충전) 이외에, 제주지역 특성으로 인해 관광객에 의한 충전이 고려되어야 한다. 이 경우에 SOC는 0%에서 충전을 수행하는 것으로 상정하였다. 이러한 충전패턴과 SOC의 추정은 충전 시나리오를 구성에 기반이 된다. 그리고 배터리의 완전충전은 SOC 90%까지 충전되는 것으로 상정하였다.

표 1은 상술한 충전시작시간, 충전패턴, 추정된 SOC, 전기차 보급률 2.8%를 반영하여 결정된 충전 시나리오를 보여준다. 전기차 충전전력 추정을 위해, 고려할 전기차 수는 식 (1)의 α, β, γ 를 이용하여 산정할 수 있으며, 그 결과에 90%는 일반적인 출·퇴근을 위한 전기차이고, 나머지 10%는 관광을 위한 전기차이다.

Table 1. Charging scenarios to estimate electric vehicle charging demand (EV 2.8%)

시나리오	충전 시간	전기차 수	설명
A	10:00	839	출근 후 직장에서 충전 (완속충전) SOC : 587대 전기차 84.4%, 나머지 50%
	12:00	93	관광객에 의한 충전 (급속충전) SOC : 모든 전기차 0%
	18:00	839	퇴근 후 가정에서 충전 (완속충전) SOC : 419대 전기차 68.9%, 나머지 30%
	22:00	93	관광객의 일과종료 후 충전 (완속충전) SOC : 모든 전기차 0%
B	10:00	839	출근 후 직장에서 충전 SOC : 587대 전기차 84.4%, 나머지 50% 완속충전 : 84.4% SOC의 전기차 급속충전 : 50.0% SOC의 전기차
	12:00	93	관광객에 의한 충전 (급속충전) SOC : 모든 전기차 0%
	18:00	839	퇴근 후 가정에서 충전 SOC : 419대 전기차 68.9%, 나머지 30% 완속충전 : 68.9% SOC의 전기차 급속충전 : 30.0% SOC의 전기차
	22:00	93	관광객에 의한 충전 (완속충전) SOC : 모든 전기차 0%

시나리오 A와 B의 차이점은 직장과 가정의 충전에서 급속충전의 여부이다. 직장에서 충전 시, 급속충전은 출근 이후에 출장업무로 인한 것이다. 그리고 퇴근 후 가정에서 충전 시, 급속충전은 개인적인 여가활동을 지원하기 위한 것이다. 그림 3은 실제 변압기 부하와 제안된 충전시나리오에 의해 산출된 전기차 충전 부하를 보여준다.

전기차 충전부하에 의한 배전 변압기의 부하율, 핫스팟 온도, 열화, 수명 분석

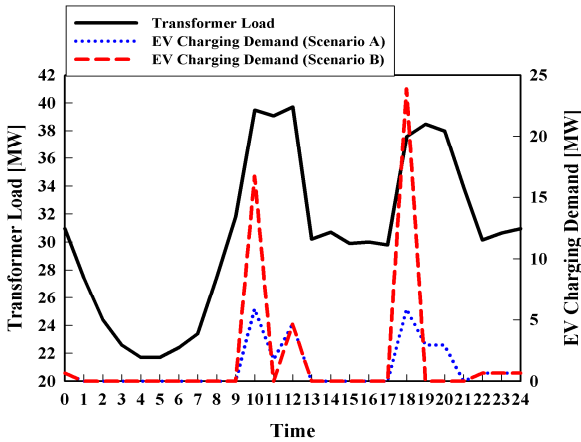


Fig. 3. Transformer load and electric vehicle charging load (EV 2.8%)

2.4 충전부하에 의한 변압기 열화추정

전기차 충전부하로 인한 변압기 열화는 충전부하의 가중 시 변압기 부하변동에 대한 핫스팟 온도, 열화 가속팩터(aging acceleration factor, F_{AA}), 등가열화팩터(equivalent acceleration factor, F_{EQA}), 수명손실(life of loss, LOL)을 계산하여 분석하였고, IEEE Std C57.91-1995 [15]을 기반으로 수행하였다. 변압기 핫스팟 온도를 계산하기 위해, [15]에서 설정된 가정(부하에 관계없이 변압기 냉각 최대, 1시간 동안 부하는 일정함, 주위온도 일정)이 본 논문에서도 적용되었다. 그리고, 핫스팟 온도를 계산하는데 필요한 변압기 상수는 표 2와 같다. 이 상수들은 본 논문에서 선정된 변압기의 실제 설계값을 취득할 수 없어, [16]에서 적용된 값을 적용한 것이다.

변압기에 전기차 충전부하가 가중되면, 변압기의 내부온도는 증가한다. 그 온도 증가로 인해 변압기 내부의 온도분포는 일정하지 않게 된다. 변압기 열화는 온도가 가장 높은 부분에서 극심하기 때문에, 변압기 내부에 가장 높은 온도(핫스팟 온도)가 열화추정에 반영되어야 한다. 변압기의 핫스팟 온도는 [15]에 따르면 식 (3)으로 계산된다. 식 (3)에서 θ_H 는 변압기의 핫스팟 온도, θ_A 는 주위온도(30°C), $\Delta\theta$ 와 $\Delta\theta_H$ 는 각각 가변된 부하로 인해 주위온도를 초과하는 변압기 상부의 절연유 온도상승분과 변압기 상부의 절연유 온도

를 초과하는 권선의 핫스팟 온도 상승분이다.

$$\theta_H = \theta_A + \Delta\theta \quad (3)$$

식 (3)에서 $\Delta\theta$ 는 식 (4)로 표현된다[15].

$$\Delta\theta \quad (4)$$

식 (4)에서 $\Delta\theta_{TO,U}$ 는 고려된 1시간 동안 부하의 종료시점에서 주위온도를 초과하는 절연유 상부의 온도 상승분이고, $\Delta\theta_{TO,i}$ 는 고려된 1시간 동안 부하의 초기에서 주위온도를 초과하는 절연유 상부의 온도상승분이다. $\Delta\theta_{TO,U}$ 는 식 (5)와 표 2의 상수를 이용하여 계산할 수 있다.

Table 2. Transformer parameters for estimation of transformer aging [16]

파라미터	수치	파라미터	수치
$\Delta\theta_{TO,R}$ [°C]	65	R	3.2
$\Delta\theta_{H,R}$ [°C]	30	n	0.9
$\Delta\theta_A$ [°C]	30	m	0.8
τ [h]	3.5	τ_w [h]	0.08

$\Delta\theta_{TO,R}$: 정격부하에서 주위온도를 초과하는 절연유 상부의 온도 상승분
 $\Delta\theta_{H,R}$: 정격부하에서 절연유 상부온도를 초과하는 권선의 핫스팟온도 상승분
 $\Delta\theta_A$: 주위온도
 R : 부하손실 비 (정격부하 손실 / 무부하 손실)
 m, n : 변압기 냉각모드에 따른 지수
 τ : 부하변동에 대한 절연유 온도상승에 대한 시정수
 τ_w : 부하변동에 대한 변압기 핫스팟 부분의 권선에 대한 시정수

$$\Delta\theta_{TO,U} = \left[\Delta\theta_{TO,R} \left(\frac{K_u^2 R + 1}{R + 1} \right)^n \right] \quad (5)$$

식 (5)에서 K_u 는 고려된 1시간 동안 부하의 종료시점에 부하율로 등가 부하율(equivalent load)을 적용하였다. 식 (5)를 식 (4)에 대입하고, 표 2의 파라미터를 적용하면 식 (6)이 유도된다.

$$\Delta\theta \quad (6)$$

식 (6)에서 $\Delta\theta$ 의 계산은 $\Delta\theta_{TO,i}$ 의 값을 요구한다.

$\Delta\theta_{TO,i}$ 는 이전 단계의 시간에서 계산된 $\Delta\theta_{TO,U}$ 를 적용한다. 식 (3)의 $\Delta\theta_H$ 는 [15]에서 상정된 가정과 절차에 따라 식 (7)로 계산할 수 있다.

$$\Delta\theta_H = \Delta\theta_{H,R} K^{2m} \quad (7)$$

식 (6), (7), 표 2의 상수를 이용하여 변압기의 핫스팟 온도가 계산되면 그 계산결과를 이용하여, 열화가 속팩터(F_{AA})가 계산된다. F_{AA} 는 식 (8)과 같다[15].

$$F_{AA} = \exp\left(\frac{15000}{383} - \frac{15000}{\theta_H + 273}\right) \quad (8)$$

변압기 핫스팟 온도가 1시간 간격으로 계산되기 때문에, F_{AA} 도 1시간 간격으로 산출될 것이다. 즉 F_{AA} 로부터, 하루 24시간 동안 변압기의 총 열화가 파악되지 않는다. 그래서 하루 24시간 동안 총 변압기 열화를 추정하기 위해, 등가열화팩터(F_{EQA})가 적용된다. F_{EQA} 는 식 (9)로 계산할 수 있다[15].

$$F_{EQA} = \frac{\sum_{n=1}^N F_{AA_n} \Delta t}{\sum_{n=1}^N \Delta t} \quad (9)$$

식 (9)에서 F_{EQA} 는 등가열화지수, Δt 는 시간간격, N 은 고려된 시간동안 총 시간간격의 수, F_{AA_n} 은 시간간격 Δt 동안 열화가속지수이다. F_{EQA} 를 이용하여 변압기 수명 손실(LOL)은 식 (10)으로 산출할 수 있다. 식 (10)에서 t 는 하루 동안의 부하를 고려하였기 때문에 24이다.

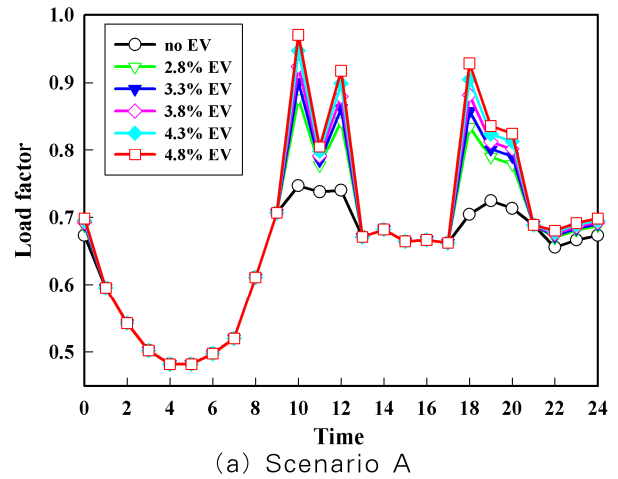
$$LOL = \frac{F_{EQA} \times t \times 100}{180,000} \quad (10)$$

3. 결과 및 고찰

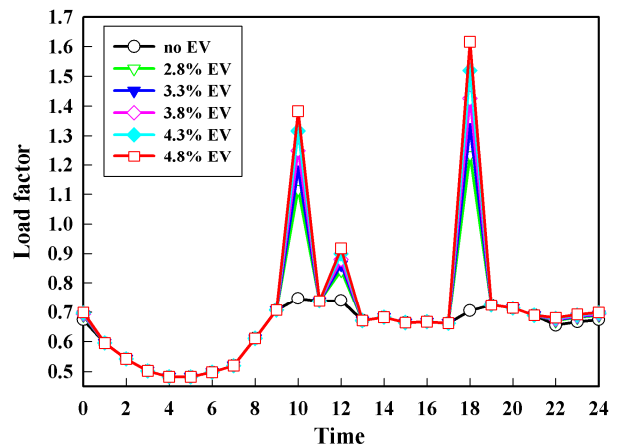
3.1 변압기 부하율과 핫스팟 온도

변압기 핫스팟 온도의 계산은 선정된 변압기의 부하율을 파악한 후 2.4항의 식 (3)~(7)을 이용하여 계산

하였다. 선정된 변압기의 부하율은 전기차 충전부하와 기존의 기저부하를 합산하여 변압기 정격용량으로 나누었고, 전기차 충전부하는 2.3항에서 설명된 충전 시나리오와 식 (1)을 이용하여 계산하였다. 식 (1)에 전기차 보급률은 2.8%외에 3.3, 3.8, 4.3, 4.8%도 적용하였다.



(a) Scenario A



(b) Scenario B

Fig. 4. Transformer load factor for electric vehicle penetration rate and charging scenario

그림 4는 제안된 충전 시나리오와 전기차 보급률에서 시간에 따른 변압기의 부하율을 보여준다. 그 그림으로부터, 변압기 부하율은 전기차 보급률의 증가와 함께 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 변압기 과부하는 시나리오 B의 경우에서 발생하며, 시나리오

A에서 초래되지 않았다. 급속충전이 빈번한 시나리오 B에서 과부하는 상정된 모든 전기차 보급률에서 발생한다. 반면에 시나리오 A는 4.8% 전기차 보급률까지 변압기 과부하 없이 전기차 충전부하를 수용한다. 이러한 결과는 전기차 충전패턴에서 급속충전의 감소가 더 높은 전기차 보급률을 수용할 수 있음을 암시한다.

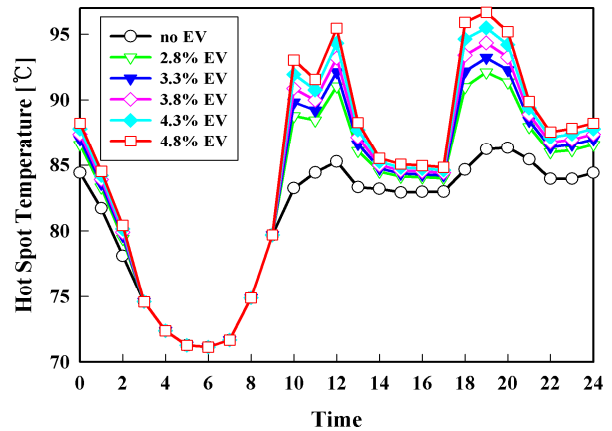
그림 4의 부하율을 기반으로 계산된 변압기 핫스팟 온도는 그림 5에서 확인할 수 있다. 전기차 충전부하가 가중될 때, 핫스팟 온도는 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 전기차 충전부하에 의해 변압기의 열화가 더욱더 가속화됨을 의미한다. 이러한 분석으로부터, 높은 전기차 보급률의 수용은 전력수급뿐만 아니라, 배전계통을 구성하는 전력설비에 대한 검토와 보장도 함께 고려하여야 가능하다. 시나리오 A에서 전기차 보급률(2.8%~4.8%)에 따른 최대 핫스팟 온도는 20:00시에서 각각 92.0, 93.2, 94.3, 95.5, 96.7°C이며, 시나리오 B에서 그 온도는 18:00시에 각각 111.5, 117.2, 123.2, 129.3, 135.8°C이다. 다시 말해서 두 시나리오에서 핫스팟 온도는 전기차 보급률과 함께 상승하며, 시나리오 B에서 그 온도 상승이 더 뚜렷하다. 추가적으로, 전기차 충전부하가 가중된 경우에도, 부하율이 동일한 시간(그림 4에서 13:00~17:00)이 존재한다. 이 시간동안 변압기의 핫스팟 온도는 전기차 충전부하가 가중된 경우에서 더 높다. 이는 변압기 내부 재료가 열을 저장 및 축적하는 특성에 기인한 것으로 추정된다[15].

본 항에서 전기차 충전부하에 의한 변압기 부하율과 핫스팟 온도가 계산되었다. 특히 핫스팟 온도는 변압기 열화를 추정하는데 적용될 수 있는데, 이를 이용한 변압기 열화와 변압기 수명은 다음항에서 설명된다.

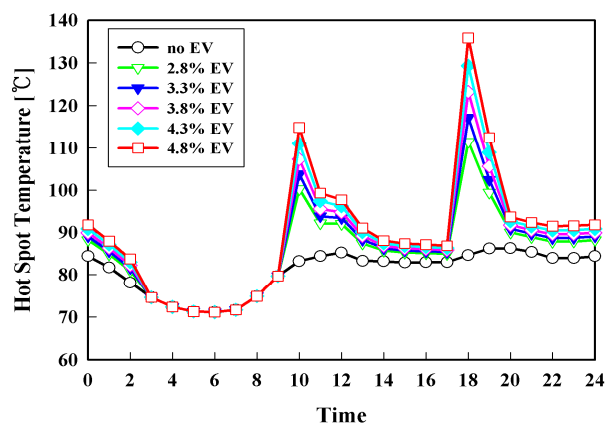
3.2 충전부하에 의한 변압기 수명 손실

전기차 충전부하의 가중에 의한 변압기 열화정도는 가속열화팩터(F_{AA})와 등가열화팩터(F_{EQA}) 의해 추정할 수 있다. 먼저 F_{AA} 는 그림 5의 결과인 핫스팟 온도를 이용하여 식 (8)로 계산하였다. 그런 후 하루 동안

변압기 열화정도를 확인하기 위해, F_{EQA} 가 F_{AA} 와 식 (9)로부터 산출되었다. 하루 동안 전기차 보급률에 따른 변압기 열화정도는 그림 6에 나타내었다. 그 그림으로부터, 전기차 보급률이 증가할수록 하루 동안 변압기 열화는 가속화됨을 알 수 있다. 이러한 가속화 결과는 검토된 2개의 시나리오에서 동일하게 나타났다. 그림 6에서 가장 주목해야 할 결과는 전기차 보급률에 따라 F_{EQA} 가 비선형적으로 상승하는 것이다. 이는 전기차 충전부하가 변압기 열화에 지대하게 기여함을 의미한다. 특히, 동일한 시간에 더욱더 많은 충전 수요를 요구하는 급속충전이 수행될 때(시나리오 B의 경우), 그 비선형적 상승은 더욱 현저하게 나타난다.



(a) Scenario A



(b) Scenario B

Fig. 5. Hot spot temperature for electric vehicle penetration rate and charging scenario

이는 변압기의 핫스팟 온도와 가속열화팩터(F_{EA}) 관계에서 식 (9)와 같이 지수 함수적 관계로 인한 것이다.

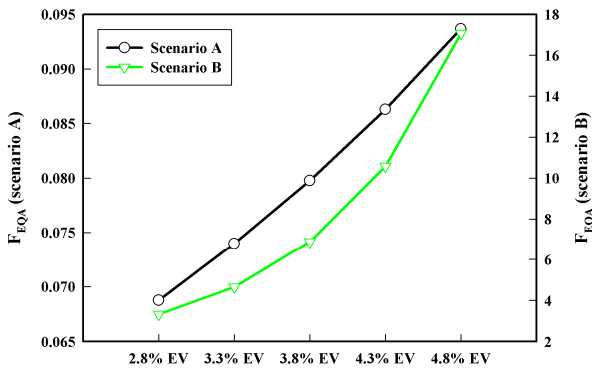


Fig. 6. Equivalent acceleration factor according to electric vehicle penetration rate

전기차 충전부하가 가중될 때, 변압기 수명 손실 (LOL)은 그림 6의 F_{EQA} 의 결과와 식 (10)을 이용하여 결정할 수 있다. LOL 과 변압기 수명 감소 시간은 표 3에 요약하였다. 수명감소시간은 LOL 과 변압기 설계수명시간(180,000 시간)을 곱한 것이다. LOL 과 수명감소시간 모두 전기차 보급률과 함께 지수 함수적으로 상승한다. 4.8% 전기차 보급률에서 시나리오 A에 대한 변압기 수명감소는 224시간(약 9일)이지만, 동일한 조건의 시나리오 B에서 그 시간은 40,954(약 1,706일, 약 5년)이다. 이들 시간은 변압기 전체 수명에 각각 0.124%와 22.75%에 해당한다. 이러한 결과는 높은 전기차 보급률의 조건에서 급속충전이 빈번하게 수행된다면, 변압기 수명단축이 동일한 조건의 완속충전보다 상당히 증가함을 의미한다. 본 논문에서 제안한 충전패턴(시나리오)이 실제와 상당히 유사하다면, 5%를 초과하는 전기차 보급률은 배전 변전소 변압기 수명을 10% 이상 감소시킬 것으로 추정된다. 전기차 보급률에 따른 변압기 열화(그림 6)와 변압기 수명단축(표 3)은 비선형적(지수 함수적)이기 때문에, 전기차 보급률이 증가할수록 변압기 수명단축은 더욱더 지대하게 나타날 것으로 판단된다.

Table 3. Transformer loss of life by penetration

rate of electric vehicle

시나리오	전기차 보급률%	LOL%	수명감소 h
A	2.8	0.000917	165
	3.3	0.000986	178
	3.8	0.001064	191
	4.3	0.001151	207
	4.8	0.001249	224
B	2.8	0.044264	7,967
	3.3	0.061979	11,156
	3.8	0.091661	16,499
	4.3	0.140965	25,374
	4.8	0.227526	40,954

4. 결론

본 논문은 높은 비율의 전기차 보급을 수용하기 위해, 전기차 충전부하가 변압기에 미치는 영향을 연구하였다. 전기차 충전전력은 제주도 전기차에 관련된 통계데이터와 제주도 특성을 반영한 2개의 제안된 시나리오를 이용하여 예측하였다. 전기차 보급률과 제안된 충전시나리오에 기반하여, 변압기의 부하율, 핫스팟 온도, 열화, 수명단축 시간이 상세히 분석되었다. 전기차 보급률이 2.8%에서 4.8%까지 0.5% 간격으로 증가할 때, 변압기 부하율과 핫스팟 온도는 전기차 보급률의 증가와 함께 상승하였으며, 변압기 열화와 수명단축 시간은 비선형적(지수 함수적)으로 상승하였다. 특히 전기차 보급률의 증가와 함께 급속충전이 빈번히 수행될 때, 변압기 수명 단축률은 전기차 보급률보다 높을 것으로 추정되었다. 본 논문의 결과들은 더 높은 전기차 보급률의 수용을 위해, 전력수급에 대응한 전기차 충전부하 전력의 정확한 예측뿐만 아니라, 배전계통 전력설비의 용량, 열화, 수명도 함께 검토해야 함을 제안하고 있다. 향후 연구는 실제 전기차 충전부하나 신뢰성 있는 충전부하의 예측결과를 이용하여 전력계통의 영향성 분석, 충전시간의 분배방법(분산 시나리오), 계통의 증설보강에 대하여 수행되어야 한다. 이 연구는 전기차 보급 확대를 위한 계통 안정화 방안을 도출하는데 기여할 수 있기 때문이다.

Acknowledgement

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20161210200560)

References

- [1] K. Qian, C. Zhou, M. Allan, and Y. Yuan, "Modeling of Load Demand Due to EV Battery Charging in Distribution Systems," *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 26, No. 2, pp. 802-810, 2011.
- [2] S. Bae, and A. Kwasinski, "Spatial and Temporal Model of Electric Vehicle Charging Demand," *IEEE Trans. Smart Grid*, Vol. 3, No. 1, pp. 394-403, 2012.
- [3] X. Dong, Y. Mu, H. Jia, J. Wu, and X. Yu, "Planning of Fast EV Charging Stations on a Round Freeway," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, Vol. 7, No. 4, pp. 1452-1461, 2016.
- [4] M. B. Arias and S. Bae, "Electric Vehicle Charging Demand Forecasting Model based on Big Data Technologies," *Appl. Energy*, Vol. 183, pp. 327-339, 2016.
- [5] Z. Liu, F. Wen, and G. Ledwich, "Optimal Planning of Electric-Vehicle Charging Stations in Distribution Systems," *IEEE Trans. Power Del.*, Vol. 28, No. 1, pp. 102-110, 2013.
- [6] A. D. Hilshey, P. D. H. Hines, P. Rezaei, and J. R. Dowds, "Estimating the Impact of Electric Vehicle Smart Charging on Distribution Transformer Aging," *IEEE Trans. Smart Grid*, Vol. 4, No. 2, pp. 905-913, 2013.
- [7] R. Godina, E. M. G. Rodrigues, J. C. O. Matias, and J. P. S. Catalão, "Smart Electric Vehicle Charging Scheduler for Overloading Prevention of an Industry Client Power Distribution Transformer," *Appl. Energy*, Vol. 178, pp. 29-42, 2016.
- [8] G. Razeghi, L. Zhang, T. Brown, and S. Samuelsen, "Impacts of Plug-in Hybrid Electric Vehicles on a Residential Transformer using Stochastic and Empirical Analysis," *J. Power Sources*, Vol. 252, pp. 277-285, 2014.
- [9] Q. Gong, S. M. -Mohler, V. Marano, and G. Rizzoni, "Study of PEV Charging on Residential Distribution Transformer Life," *IEEE Trans. Smart Grid*, Vol. 3, No. 1, pp. 404-412, 2012.
- [10] Q. Gong, S. M. -Mohler, E. Serra, V. Marano, and G. Rizzoni, "PEV Charging Control Considering Transformer Life and Experimental Validation of a 25 kVA Distribution Transformer," *IEEE Trans. Smart Grid*, Vol. 6, No. 2, pp. 648-656, 2015.
- [11] JEJU Electric Vehicle Policy Research Center, "JEJU EV MONTHLY REPORT," Jeju Research Institute, 2018 Aprile, pp. 1-32, 2018.
- [12] Jeju Special Self-Governing Province, "2018 main

administrative statistics," <http://www.jeju.go.kr/open/stats/list/survey/2018.htm>.

- [13] <http://www.jejuits.go.kr/trafficStats/load.do>.
- [14] S. Son, "Electric Vehicle: an Analysis of User Behavior and Environmental Benefit," Jeju Development Institute, 2014-16, p. 60, 2014.
- [15] IEEE C57.91-1995, "IEEE Guide for loading mineral-oil-immersed transformer," 1995.
- [16] K. Qian, C. Zhou, and Y. Yuan, "Impacts of high penetration level of fully electric vehicles charging loads on the thermal ageing of power transformers," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, Vol. 65, pp. 102-112, 2015.

Biography



Dong-Young Lim

was born in 1983. He received B.S. degrees in electronic engineering in 2009 from Gyeongju University and the M.S. degrees and Ph.D in electrical engineering in 2011 and 2015 from Yeungnam University. He is

now a Postdoc in the Department of Electrical Engineering at Hanyang University.



Sungwoo Bae

received the B.S. degree from Hanyang University and the M.S.E. and Ph.D. degrees from the University of Texas at Austin, all in electrical engineering, in 2006, 2009, and 2011, respectively.

From 2012 to 2013, he was with Power Center at Samsung Advanced Institute of Technology and an Assistant Professor in the Department of Electrical Engineering at Yeungnam University from 2013 to 2017. He has been an Assistant Professor in the Department of Electrical Engineering, Hanyang University since 2017. In 2005, Dr. Bae was awarded the Grand Prize at the national electrical engineering design contest by the Minister of Commerce, Industry and Energy of the Republic of Korea.