ISSN 1229-800X(Print) / ISSN 2586-7792(Online)
The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 67P, No. 2, pp. 70~74, 2018
http://doi.org/10.5370/KIEEP.2018.67.2.070

송변전 변압기 자산관리를 위한 수명손실 계산

Lifetime Loss Calculation for Asset Management of a Power Transformer

이 온 유* · 이 홍 석* · 전 상 수* · 정 민 경* · 강 형 구†
(Onyou Lee · Hongseok Lee · Sangsu Jeon · Minkyung Jeong · Hyoungku Kang)

Abstract - Social infrastructure such as production, transportation, gas, and electrical facilities would be degraded according to time and those facilities might need more maintenances, repairing, and management as time goes by. Especially, in the case of a power transformer, it is important to diagnose the transformer in order to avoid malfunction and failure because they could cause enormous damage. The economic as well as technical aspects of a transformer management must be considered while it is operated. Therefore, the concept of asset management should be applied as an advanced method of transformer management. Asset management refers to a series of processes to make a plan of maintenance and conservation of a power transformer considering the soundness, investment cost, and importance of equipment. It is important to apply the asset management considering calculation of a lifetime loss. In this paper, the lifetime loss calculation method of asset management for a power transformer is suggested.

Key Words : Asset management, Lifetime loss, Power transformer

1. 서 론

1.1 연구의 배경

전력용 변압기 자산관리를 위해서는 기술적인 측면과 경제적인 측면이 동시에 고려되어야 한다. 전력용 변압기 자산관리를 위해서는 각 분야에 대한 고도의 전문성이 요구되기 때문에 기술적 측면과 경제적 측면으로 나누어 접근하고 이를 종합적으로 검토하여야 한다. 기술적 측면은 전력용 변압기의 건전도 상태를 파악할 수 있는 진단기법을 수행하는 것뿐만 아니라 자산의 수명예측 기법을 개발하는 것을 포함한다. 또한 경제적 측면은 전력용 변압기의 고장 결과와 생산 손실 및 비용 등을 고려하여 전력용 변압기의 수리비용 및 교체비용 등의 투자 가치를 판단하는 것을 의미한다. 따라서 자산관리 과정에서 자산 상태에 맞는 유지·보전 방법을 선택하고 수행하는 것은 매우 중요한 과정이다.

자산의 유지·보전 기술의 발달과정은 시대에 따라 지속적으로 변화하고 있다. 1950년대까지는 고장 후 보수를 수행하는 사후 정비 (Breakdown Maintenance: BM, Corrective Maintenance : CM) 기술이 주로 사용되었다. 이후 1970년대까지는 예방 정비 (Prevention Maintenance: PM) 기술 중에서 자산의 부품을 일정 시간마다 교체하는 시간기준 정비 (Time Based Maintenance: TBM) 기술이 사용되었다. 또한, 2000년대 까지는 센서기술 및 디지털기술의 발달로 인하여 신뢰성기반 정비 (Reliability Centered Maintenance: RCM) 기술과 함께 상태기반 정비 (Condition Based Maintenance: CBM) 기술이 사용되었다. CBM 기술은 추후 정보통신 기술이 발전함에 따라 big data를 기반으로 한 정보중심 정비 (Knowledge Based Maintenance: KBM) 기술로 발달하였다[1]. 2000년대 이후에는 송·변전 설비를 실물자산으로 평가하기 시작하면서 자산의 기술적 평가와 경제적 평가를 종합한 위험도기반 정비 (Risk Based Maintenance: RBM) 기술로 발전되었다. 이와 같은 RBM 기술은 ERP시스템에 적용되어 자산을 보유한 기관의 수익을 관리하는 방식 (Enterprise Asset Management: EAM)으로까지 확대되었다.

1.2 전력용 변압기 수명손실 분석의 필요성

일반적으로 다량 생산하는 부품은 수명이 짧고, 표본 수가 정규분포를 형성하므로 통계 데이터를 이용하여 평균수명을 산출할 수 있다. 그러나 전력용 변압기와 같이 수작업의 소량 생산, 고가, 고장수명의 표본 수가 극히 부족한 특징을 가지고 있을 뿐만 아니라 고장 시 파급효과가 큰 제품의 경우에는 고장 시점까지 운전하지 않고 위험도가 증가한다고 판단될 경우 교체한다.

그림 1은 권선 절연유의 최고 온도 (hot spot temperature: HST)에 따른 단위수명(per unit of normal life: PNUL) 그래프이다. 일반적으로 전력용 변압기의 수명은 절연지의 수명을 기준으로 하며, 이때 절연지 열화계산은 식 (1)과 같이 Arrhenius 반응식을 이용한다. 식 (1)은 절연지의 기계적 강도 기준치를 50% 또는 25%, 평균 중합도를

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Korea National University of Transportation, Chungju 380-702, Korea
E-mail : kang@ut.ac.kr
* Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Korea National University of Transportation, Chungju 380-702, Korea
접수일자 : 2018년 2월 28일
수정일자 : 2018년 5월 25일
최종완료 : 2018년 5월 29일

200 등으로 설정한 경우의 열화계산식이다. 단위수명은 온도에 따른 전력용 변압기 절연물 수명으로 1인 경우, 정상 수명손실을 나타낸다[2].

$$PUNL = Ae^{\left(\frac{B}{\theta_H + 273}\right)} \quad (1)$$

여기서, A : 110℃에서 단위정상수명(9.8×10^{-18})
θ_H : 권선 절연유 최고 온도
B : 열화율(전력용 변압기 15,000) 이다.

110℃ 이상의 온도에서는 절연열화가 가속된다. 표 1은 권선 절연유 최고 온도에 따른 절연지 수명을 나타낸 것이다. Arrhenius 반응식에 의하면 부하량이 적어 권선 절연유 최고 온도가 110℃보다 현저히 작은 경우에는 절연지의 수명은 수백 년에 달할 수 있다. 따라서 이러한 계산법은 현실성이 없는 매우 긴 수명이 계산되므로 전력용 변압기의 수명손실 계산에 적합하지 않다고 판단된다. 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 열화가속 지수 (Aging Acceleration Factor, FAA)를 이용하여 절연지의 수명손실을 계산하는 과정이 필요하다. 본 논문에서는 Arrhenius 반응율을 이용하여 현실적인 전력용 변압기의 수명손실을 계산하는 과정을 유도하고 임의의 전력용 변압기의 부하데이터를 모의하여 수명손실을 계산하고 잔여수명을 산출하였다.

표 1 권선 절연유 최고 온도에 따른 절연지 수명
Table 1 Insulating paper life according to hot spot temperature

Load [MVA]	Hottest Temperature of Winding in Oil [℃]	Life Dielectric Characteristics
20 (100%)	110	7.42
18 (90%)	99	23.7
16 (80%)	88	77.8
14 (70%)	78	274.7
12 (60%)	67	1,050
10 (50%)	56	4,379
8 (40%)	46	20,093

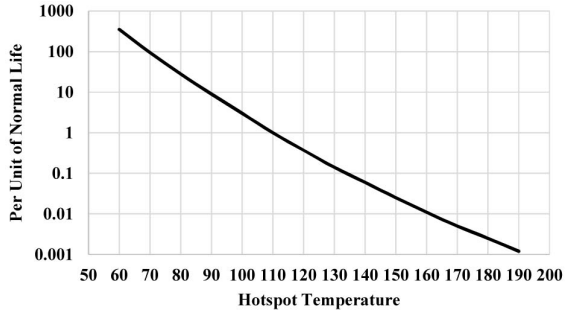

그림 1 절연지의 수명곡선
Fig. 1 Transformer insulation life

2. 본 론

2.1 전력용 변압기의 수명손실 계산

Arrhenius 반응율을 이용하여 전력용 변압기의 수명손실을 계산하는 방법은 IEEE Std C57.91 규정인 IEEE Guide for Loading Mineral Oil Immersed Transformer and Step Voltage Regulators에 규정되어 있다[2]. 본 규정은 정격 이상의 과부하 운전 시에 발생할 수 있는 위험성을 설명 및 예측하고, 가이드라인을 확립하여 위험성을 적당한 수준에서 최소화하기 위하여 작성되었다. 규정에서는 절연지의 열화율을 계산하고, 절연지의 기계적 강도가 기준치 이하로 저하되는 시점을 기준으로 수명을 산출한다. 전력용 변압기의 수명을 결정하는 요인으로 크게 온도, 수분, 산소가 있다[3]. 이와 같은 데이터를 분석하기 위하여 Arrhenius 식을 사용한 시간당 열화가속 계수(FAA)와 수명손실을 계산하는 방법이 주로 사용되고 있다[2]. 1948년, Dakin에 의해 Arrhenius 반응율을 이용한 온도에 따른 절연지의 열화율이 정의되었다. 이후, Arrhenius 반응율을 이용하여 절연지의 수명손실을 예측할 수 있게 되었다. 절연지의 수명손실은 전력용 변압기의 수명손실과 직결된다. 전력용 변압기 수명손실을 전력용 변압기 설비 자산관리에 효과적으로 적용하기 위하여 Arrhenius 반응식을 이용한 절연지의 수명손실 도출 과정을 다음과 같이 그림 2에 나타내었다.

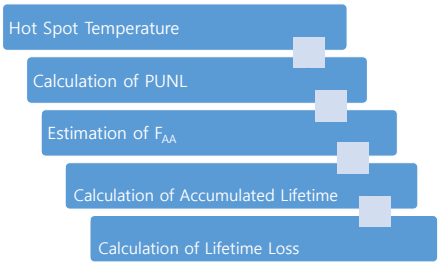

그림 2 전력용 변압기 수명손실 계산 process
Fig. 2 Transformer life loss calculation process

2.2 권선 절연유 최고 온도 계산법

전력용 변압기 수명손실에는 권선 절연유 최고 온도 계산이 필요하다. 구형 전력용 변압기의 경우, 전력용 변압기 수명손실 계산에 추가적으로 수분 함유량과 산소 함유량을 고려하여야 한다. 전력용 변압기의 관리자가 권선 절연유 최고 온도를 측정하여 직접적으로 데이터를 확보할 수 있다면 별도의 온도 계산은 필요하지 않다. 그러나 현재 우리나라에서는 전력용 변압기의 권선 절연유 최고 온도를 직접적으로 측정하지 않기 때문에 권선 절연유 최고 온도를 간접적으로 계산 및 유추하는 방법이 필요하다. IEEE 문헌인 Guide for Loading Mineral Oil Immersed Transformers and Step Voltage Regulators에서는 이와 같은 권선 절연유 최고 온도를 계산하기 위해서 필요한 데이터가 24개일 뿐만 아니라 우리나라에서는 현재 이 중에서도 대부분의 데이터가 확보되지 않고 있다. 여러 기관에서 권선 절연유 최고 온도를 보

다 쉽게 계산하기 위하여 실험을 통한 다양한 노력이 있어 왔으며 이와 같은 IEEE 문헌에서 제시하는 방법 이외에도 권선 절연유 최고 온도를 유추하는 방안을 다양한 문헌에서 제시하고 있다[4]. 다음의 식 (2)에서는 권선 절연유 최고 상승온도를 계산하는 식을 나타내었다.

$$\triangle\theta_H = \theta_H - \theta_A \tag{2}$$

여기서, θ_A : 주변 온도이다.

권선 절연유 최고 상승온도는 권선 절연유 최고 온도와 주변 온도의 차로서 계산할 수 있다. 식 (3)은 권선 절연유 최고 온도 계산식을 나타내었다.

$$\theta_H = \theta_0 + (H \times g_c) \tag{3}$$

여기서, θ_o : 상부 절연유 온도
g_c : 절연유 온도 차에서 교정된 평균 권선 온도
H : 최고온도 계수이다.

배전용 전력용 변압기의 H는 1.1, 전력용 변압기의 H는 1.3으로 IEC 60076-2 규정에서 정의되어 있다. 다음의 식 (4)는 절연유 온도 차를 통하여 교정된 평균 권선 온도의 계산식을 나타내었다.

$$g_c = g(\frac{I_r}{I_l})^{1.6} \tag{4}$$

여기서, g : 절연유 온도차에서 평균 권선 온도
I_r : 정격전류
I_l : 인가전류이다.

식 (6)은 절연유 온도차에서 평균 권선 온도 계산식을 나타내었다.

$$g = \theta_w - \theta_{om} \tag{5}$$

$$\theta_{om} = \theta_0 - \frac{\theta u - \theta_b}{2} \tag{6}$$

$$\theta_w = \frac{R_w}{R_1}(235 + \theta_1) - 235 \tag{7}$$

$$\theta_1 = \theta_{o_1} - \frac{\theta_{u_1} - \theta_{b_1}}{2} \tag{8}$$

여기서, θ_w : 평균 권선 온도
θ_{om} : 평균 절연유 온도
θ_o : 상부 절연유 온도
θ_u : Radiator 내 상부 온도
θ_b : Radiator 내 하부 온도
R_w : 단락상태에서 권선 저항
R_2 : 전력공급의 단락 후에 권선 저항
θ_1 : heat run test 이전의 절연유 온도이다.

이와 같은 방법으로 권선 절연유 최고 온도를 계산하기 위해서는 6개 항목의 데이터가 필요하며 이를 표 2에 나타내었다[4].

우리나라에서는 전력용 변압기의 정격전류, 인가전류, 부하손실은 확보하고 있지만, 상부 절연유 온도, 평균 권선 온도, 평균 절연유 온도는 측정하지 않고 있는 상태이다. 권선 상부 절연유 온도의 경우는 측정하고 있지만 별도로 저장은 하지 않고 있다. 따라서 현재 측정하고 있는 권선 상부의 절연유 온도를 추가적으로 저장한다면 권선 절연유 최고 온도를 도출할 수 있는 방안이 될 수 있을 것이다. 이와 같은 방법을 향후에 수정, 보완한다면 전력용 변압기의 자산관리를 위한 수명손실 계산에 효과적으로 이용할 수 있을 것이다.

표 2 권선 절연유 최고 온도 계산에 필요한 Input 데이터 항목

Table 2 Data required for hot spot temperature calculation

Necessary Input Data (6ea)
Temperature of Upper Oil (θ_o), Average Temperature of Winding (θ_w), Average Temperature of Oil (θ_{om}), Rated Current, Rated Voltage, Loss of Load

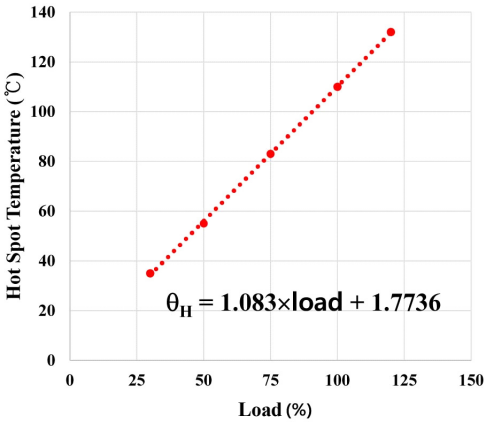

그림 3 부하율에 따른 전력용 변압기의 권선 절연유 최고 온도

Fig. 3 Hot spot temperature of power transformer according to load

본 논문에서 부하율에 따른 권선 절연유 최고 온도는 계산에 필요한 input 데이터가 부족하여 실제 권선 절연유 최고 온도 측정 실험값의 비율을 이용하여 계산에 적용하였다. 권선 절연유 최고 온도는 전력용 변압기의 제조사 및 운전 환경에 따라 다를 수 있기 때문에 이 계산 방식에는 오류가 있을 수밖에 없지만, 전력용 변압기의 부하율에 따른 권선 절연유 최고 온도에 의하여 발생하는 수명손실을 계산하고 그 결과를 통하여 실제 전력용 변압기의 자산관리에 적용하기 위한 선행 연구로서의 의미가 크다고 할 수 있다. 그림 3에는 154/22.9kV, 15/20MVA 용량을 가지는 전력용 변압기에서 부하율을 점차 증가시키면서 측정한 권선 절연유 최고 온도와 계산식을 나타내었다[4].

2.3 열화가속 지수 (F_{AA}) 계산법

권선 절연유 최고 온도를 측정하면 Arrhenius 반응식을 이용하여 단위수명을 계산할 수 있으며, 여기에 역수를 취하여 열화가속 지수를 식 (9)과 같이 구할 수 있다.

$$F_{AA} = e\left(\frac{15{,}000}{383} - \frac{15{,}000}{\theta_H + 273}\right) \tag{9}$$

여기서, F_{AA} : 시간 간격 $\triangle t_n$ 동안 존재하는 온도로 인한 열화가속 factor이다.

열화가속 지수는 특정 권선 절연유 최고 온도에서 열화의 정도를 나타낸다. 권선 절연유 최고 온도는 부하율에 의하여 결정되고, 실제 시간에 따라 부하율이 변화하므로 권선 절연유 최고 온도 역시 시간에 따라 변화한다. 110℃일 때 F_{AA}는 1이며 온도 데이터를 매시간 수집하게 되면 F_{AA}는 시간당 열화된 시간을 의미하게 된다. 그림 4의 부하 패턴은 주거지역인 서울 송파의 154kV/20MVA 급 단상 변압기를 모의한 것으로서 단시간 110% 과부하 운전을 허용하는 전력용 변압기에서 발생하는 부하율을 임의로 모의하여 열화가속 지수를 계산한 결과값을 나타내었다. 일반적으로 전력용 변압기의 부하 데이터는 1시간 단위로 부하율을 기록하며, 권선 절연유 최고 온도 또한 1시간 단위로 측정 또는 계산될 수 있다. 따라서 그림 4에서 계산된 열화가속 지수는 매시간 동안 발생한 열화시간이다.

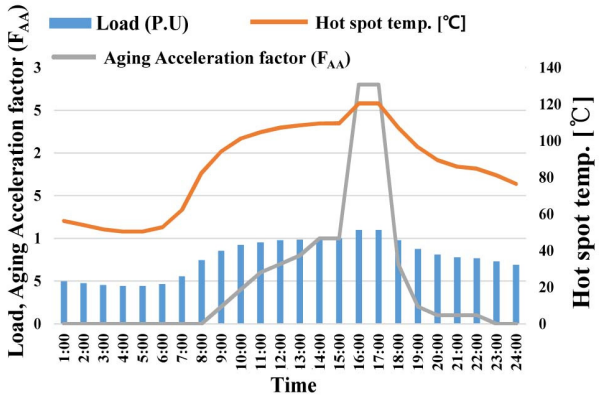

그림 4 전력용 변압기의 부하 사이클을 모의한 열화가속 지수 계산

Fig. 4 FAA calculation simulating load cycle of power transformer

2.4 누적 수명손실 계산법

누적 열화 시간(Cumulative age hours)은 전력용 변압기가 운전된 시간 동안 발생한 F_{AA}의 합을 말한다. 다음의 식 (10)과 같이 F_{AA}를 누적하면 총 열화시간인 누적 수명손실(Accumulate loss of life)을 도출할 수 있다.

$$Accumulate\ Loss\ of\ Life = \sum_{n=1}^{N} (F_{AA,n} \times \triangle t_n) \tag{10}$$

여기서, $\triangle t_n$: 시간의 변화량

$F_{AA,n}$: 해당 시간의 열화가속 계수를 의미한다.

계산된 누적 열화시간을 수명손실률(% loss of life) 도출식에 대입하면 절연지 수명손실이 계산된다. 식 (11)은 % loss of life 계산식을 나타내었다.

$$\%Loss\ of\ Life = \frac{Accumulate\ Loss\ of\ Life}{Total\ Nomal\ Life} \times 100 \tag{11}$$

총 수명시간은 전력용 변압기의 총 수명을 의미한다. 그림 4에서 계산된 하루 동안의 열화가속 지수를 누적하면 11.6시간이다. IEEE Guide에서 정상부하 100%, 권선 절연유 최고온도 110℃로 꾸준히 운전하는 변압기를 기준으로 제시하는 전력용 변압기의 총 수명 20년 (180,000시간)을 적용하여 부하 변동이 발생하는 실제 변압기 상태를 가정하여 계산한 24시간 동안 발생한 절연지 수명손실률 계산식은 식 (12)와 같다.

$$\begin{aligned} \%Loss\ of\ Life &= \frac{Accumulate\ Loss\ of\ Life}{Total\ Nomal\ Life} \times 100 \\ &= \frac{11.6}{180{,}000} \times 100 \\ &= 0.0064\% \end{aligned} \tag{12}$$

이와 같이 하루 0.0064%의 수명손실이 꾸준히 발생하게 되면 약 43년 동안 전력용 변압기를 사용할 수 있는 것으로 계산된다. 또한, 전력용 변압기의 총 수명을 몇 시간으로 결정할지는 자산관리자의 목적에 따라 상이하다. 본 논문에서는 수명손실 계산에 사용되는 전력용 변압기 총 수명을 180,000시간으로 설정하였지만, 전력용 변압기 총 수명은 자산관리의 한 과정 중인 고장율 분석을 적용하여 도출할 수 있다. 자산관리 수행 환경에 적합한 기준을 적용하여 전력용 변압기 수명손실을 계산하면 보다 높은 신뢰도를 유지할 수 있기 때문에 자산관리의 목적에 맞게 기준을 정하는 것이 중요하다고 판단된다. 전력용 변압기의 수명을 예측·관리하는 것은 전력용 변압기의 상태를 모니터링하고 안정성을 간접적으로 평가하는 과정이며, 이와 같은 방법으로 국내에서 전력용 변압기 수명을 평가하려는 시도는 처음이기에 더욱 의미있는 연구라고 판단된다. 향후 보다 정확하게 전력용 변압기의 안정성을 평가하기 위해서는 전력용 변압기 권선 절연유 최고 상승 온도 계산에 필요한 다양한 데이터를 수집·관리하는 과정이 반드시 필요하다.

3. 결 론

자산관리의 목적은 자산관리를 통하여 경제성과 건전도와 같은 측면의 자산 가치를 극대화시키는데 있다. 현재 전 세계적으로 전력용 변압기에 대한 자산관리 기술은 성능과 경제성을 고려하여 개발되고 있다. 그러나, 국내 전력용 변압기 자산은 현재까지도 주로 사용년수 측면 위주로 관리되고 있다. 그러므로 전력용 변압기의 부하량에 따른 수명손실을 분석하여 전력용 변압기 상태를 기반으로 하는 유지보전 기술을 적용하여 전력용 변압기를 체계적으로 관리하는 것이

필요하다. 본 논문에서는 전력용 변압기 수명을 평가하여 전력용 변압기 자산을 효과적으로 관리할 수 있도록 전력용 변압기 수명손실 계산법을 정리하였다. 또한, 자산관리 시스템은 관리자의 목적에 따라 프로세스와 진단방법을 달리하기 때문에 본 논문에서 제시한 수명손실 계산 및 전력용 변압기 총 수명을 관리자의 목적에 맞게 적용하는 작업이 필요하다. 특히, 권선 상부 절연유 온도를 비롯하여 지금까지 저장하지 않았던 각종 전력용 변압기 데이터를 저장하면 전력용 변압기 상태를 보다 구체적으로 관리할 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. 2018R1A2B6007691).

이 논문은 2017년 한국교통대학교 지원을 받아 수행하였음.

References

[1] S. M. Strachan, “Knowledge-based diagnosis of partial discharges in power transformers,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 15, no. 1, February, 2008.

[2] IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Tranformers and Step-Voltage Regulators.

[3] L. Van der Zel, “Transformer Aging as a Function of Temperature, Moisture, and Oxygen,” *Technical Update*, December 2007.

[3] C. Cuttle, People and windows in workplaces, in: Proceedings of the People and Physical Environment Research Conference, Wellington, New Zealand, pp. 203-212, 1983.

[4] Dong-Jin Kweon, “A Study on the hot Spot Temperature in 154 kV Power Transformers),” *Journal of Electrical Engineering & Technology*, vol. 7, no. 3, pp. 312-319, 2012.

저 자 소 개

이 온 유 (Onyou Lee)

She received the M.S. degree in the Department of Electrical Engineering, Korea National University of Transportation, Chungju Korea, in 2017. She is Currently a D.S course in the Department of Electrical Engineering, Korea National University of the Transportation, Chungju Korea.

E-mail : onyou@ut.ac.kr

이 홍 석 (Hongseok Lee)

He received the M.S. degree in the Department of Electrical Engineering, Korea National University of Transportation, Chungju Korea, in 2016. He is Currently a D.S course in the Department of Electrical Engineering, Korea National University of the Transportation, Chungju Korea.

E-mail : hsuk@ut.ac.kr

정 민 경 (Minkyung Jeong)

She received the B.S. degree in the Department of Electrical Engineering, Korea National University of Transportation, Chungju Korea, in 2018. She is Currently a M.S course in the Department of Electrical Engineering, Korea National University of the Transportation, Chungju Korea.

E-mail : j-sky1804@ut.ac.kr

전 상 수 (Sangsu Jeon)

He received the B.S. degree in the Department of Electrical Engineering, Korea National University of Transportation, Chungju Korea, in 2017. He is Currently a M.S course in the Department of Electrical Engineering, Korea National University of the Transportation, Chungju Korea.

E-mail : jss023@ut.ac.kr

강 형 구 (Hyoungku Kang)

He received the B.S and M.S degree in the Department of Electrical Engineering, Sung Kyun Kwan University, Suwon, Korea, in 1997 and 1999, respectively and the Ph.D. in the School of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University, Seoul, Korea, in 2005. He was Chief Researcher in Electro-Mechanical Research Institute, Hyundai Heavy Industries Co., Ltd., Gyeonggi-do, Korea, during 2005-2009. He is currently a Professor in the Dept. of Electrical Engineering, Korea National University of Transportation, Chungju, Korea.

Copyright ⓒ The Korean Institute of Electrical Engineers

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.