

A Study on the Application of a 3-Phase 4-Wire Zig-Zag Filter in a 100kW Electric Vehicle Fast Charger

100kW급 전기자동차 급속충전장치에서 3상 4선식 지그재그 필터의 적용에 관한 연구

Jin-Yong Bae

배진용[†]

Abstract

This study proposes a 3-phase 4-wire zigzag filter that is applicable to a 100 kW electric vehicle (EV) fast charger. The 30 kW class four power converter linked in parallel results in a current imbalance at the input terminal, leading to a sharp, unbalanced current at the neutral point of a 100 kW high-capacity rapid charging apparatus. Moreover, owing to increased harmonic noise, decreased power factor, increased reactive power, decreased active power, decreased efficiency, and electromagnetic wave generation, the unbalanced current at the neutral point is a primary cause of EV charger failures. This study proposes an ideal 3-phase 4-wire zigzag filter for a 100 kW EV fast charger and experimentally verifies that it lowers the neutral point unbalanced current, eliminating harmonics and reaching a peak efficiency of 95.632%.

Key Words

Zig-Zag Filter, 3-Phase 4-Wire, Fast Charger, EV(Electric Vehicle), Neutral Point Noise Reduction, Harmonic Reduction, Power Factor Correction, High Efficiency

1. 서 론

전기자동차는 기존의 내연기관 자동차를 대신하는 이동 수단으로 국제적인 노력과 함께 정부정책으로 보급이 급격하게 증가하고 있다[1-2]. 보다 안정적인 전기자동차의 보급을 위하여 충전시스템 확충은 필수적이며, 필요시 전기자동차를 보다 빠르게 충전하기 위한 100kW급 이상의 급속충전장치는 가장 핵심적인 것이다. 현재 고속도로 휴게소 및 거점충전소를 중심으로 100kW급 이상의 급속충전장치에서는 기기의 효율증대 및 고장방지를 위하여 노이즈 저감에 대한 연구의 필요성이 대두되고 있다[3-19].

100kW급 이상의 전기자동차 급속충전장치는 3상 4선식 전력시스템을 적용하고 있으며, 노이즈 저감과 관련된 연구동향은 다음과 같다. Rodríguez[3]는 3상 4선식 전력시스템에서 3상 고조파 전류를 제거하기 위하여 R-L-C 직렬로 연결된 FBS(Four-Branch Star) 필터의 적용과 임피던스 특성의 해석과 전류 노이즈 저감 방법을 제안하였다. 이는 R-L-C 직렬회로 4개를 3상 전원과 중성선(n상)에 연결하는 수동필터 방식으로 임피던스 및 공진주파수 배치를 통해서 특정(特定) 주파수에서 노이즈를 저감시키는 방식에 대하여 연구하였다.

Lewis[4] 3상 4선식 방식에서 지그재그(Zig-Zag) 결선을 최

초로 발명하였으며, Khera[5]는 3상 4선식 전력시스템에서 지그재그(Zig-Zag) 변압기 결선과 이의 벡터도(Vector Diagram)에 관하여 연구하였다. 3상 4선식 전력시스템에서 보다 발전적인 연구로서 Fukami[6]는 동기전동기(Synchronous Machine)의 3상 전기자(Armature)의 각 상을 3상 전원과 접속시키며, 중성선(n상)에 리액터를 함께 배치시킴으로서 동기전동기에서 진상(Leading) 또는 지상(Lagging) 전류의 공급이 가능하게 되어 비선형 부하(Nonlinear Load)로 인한 불평형 전류로 인한 역률저감을 개선하는 방안을 제안하였다.

Enjeti[7]는 3상 4선식 전력시스템에서 델타(Δ) 결선과 Y결선을 단상(Single Phase) 하프브리지(Half Bridge)와 3상 브리지 다이오드 정류기를 결합적으로 적용하여 중성선(n상) 노이즈 전류를 저감시키는 방법을 실험적으로 연구하고 분석하였다. 여기서 델타(Δ) 결선과 Y결선은 단일 코어를 사용하여 자기적으로 결합시켰으며, 전류 고조파를 저감시키는 능동전력 필터(Active Power Filter)의 회로를 제시하였다.

Kamath[8]은 3상 4선식 전력시스템에서 지그재그(Zig-Zag) 구조의 Y결선 및 델타(Δ) 결선을 자기적으로 결합되는 방식에 대하여 연구하였다. 지그재그(Zig-Zag) 델타(Δ) 결선에는 스위칭 소자로 구성된 제1 능동필터(Active Filter)가 연결되어 3상의 불평형 전류를 보상하고, 지그재그(Zig-Zag) Y결선의

[†] Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Suwon University, Republic of Korea.

E-mail : bjy@suwon.ac.kr <https://orcid.org/0000-0003-0554-3621>

Received : Dec. 07, 2024 Revised : Jan. 29, 2025 Accepted : May. 20, 2025

중성선(n상)에는 스위칭 소자로 구성된 제2 능동필터(Active Filter)가 연결시킴으로 고조파 전류의 노이즈인 영상분 전류를 보상하는 방식에 대하여 연구하였다.

Singh[9]은 3상 4선식 전력시스템에서 T형상으로 구성된 변압기와 3상 전압원 기반의 능동필터(Active Filter)를 적용하여 불평형 전류를 보상하는 방법을 연구하였다. 이는 무효전력 보상, 고조파 제거, 부하 밸런싱 및 역률보상의 기능을 가지고 있으며, 기존의 지그재그(Zig-Zag) 방식은 권선비 1:1인 단상 변압기가 3개 필요하지만, T형상으로 구성된 변압기는 권선비 1:1인 단상변압기가 2개 사용되기에 보다 단순한 구조적인 특징이 있다.

Jayaprakash[10]은 3상 4선식 전력시스템에서 성형/6각형(Star/Hexagon)으로 자기적으로 결합된 변압기와 H-브리지(H-Bridge) 기반의 능동필터(Active Filter)를 적용하여 불평형 전류를 보상하는 방법을 제안하였다. 여기서 성형/6각형의 자기적으로 결합된 변압기는 구조적으로는 다소 복잡하지만, 무효전력 보상, 고조파 제거, 부하 밸런싱 및 역률보상에서 전체적으로 매우 만족스러운 성능의 장점을 가지고 있다.

Choi[11-12]는 3상 지그재그(Zig-Zag) 필터와 3상 브리지 다이오드 정류기 및 단상 능동필터(Active Filter)를 기반으로 하는 하이브리드(Hybrid) 필터를 사용하여 중성선(n상) 고조파 저감 및 보상 특성에 대하여 분석하였다. 이는 3상 4선식 전력시스템에서 3상 지그재그 필터와 간단한 구조의 단상 능동필터의 적용으로 고조파 전류 보상을 가능하게 하였다.

Nishida[13]는 3상 브리지 6펄스 다이오드 정류기를 위하여 고조파를 저감하기 위한 방법으로 지그재그(Zig-Zag) 변압기와 다이오드와 결합 인덕터(Coupled Inductor)로 구성된 보조 회로를 이용하여 고조파 전류를 저감하는 방법을 제안하였다. 이는 능동 스위치를 사용하지 않으며 지그재그 변압기 및 다이오드의 수동소자의 적용으로도 양호한 역률개선을 보이고 있다. Liu[14]는 하이브리드(Hybrid) AC/DC 전송 시스템에서 지그재그(Zig-Zag) 변압기의 포화 완화를 위한 임피던스 조절기(Impedance Conditioner)를 제안하였고, Jou[13]는 3상 4선식 배전시스템에서 지그재그(Zig-Zag) 변압기 적용 및 해석을 수행하였으며, Singh[14]은 지그재그(Zig-Zag) 변압기와 다양한 방식의 능동필터(Active Filter)의 적용과 그 특성을 비교 및 분석하였다. Cui[15]는 바이폴라(Bipolar) MVDC(Medium-Voltage Direct-Current)용 지그재그(Zig-Zag) 변압기를 적용한 모듈형 멀티레벨 컨버터(MMC : Modular Multilevel Converter) 시스템을 연구하였다. Jou[16]는 3상 4선식 전력시스템에서 3상 능동필터(Active Filter)와 지그재그(Zig-Zag) 변압기를 동시에 적용하여 고조파 전류를 저감하는 방안을 공개함을 통하여 대전력 전송분야에서 지그재그(Zig-Zag) 변압기를 사용한 노이즈 저감, 역률개선 및 무효전력 조절에 대한 다각적인 연구가 수행되었다. 기존의 연구동향을 바탕으로 본 논문에서는 지그재그(Zig-Zag) 변압기를 100kW급 3상 4선식 전력시스템의 대용량 급속충전장치 적용에 대하여 연

구하였다. 기본적으로 100kW급의 급속충전장치는 단일 모

듈 방식이 아니라 30kW급 서브(Sub) 모듈의 병렬운전 방식을 기반으로 하고 있다. 이상적으로는 소형의 서브(Sub) 모듈이 완전히 동일한 경우, 입력단 전류 불균형은 발생하지 않는다. 하지만, 실제 서브(Sub) 모듈의 불균형으로 인하여 중성선(n상)에 부족한 불평형 전류가 발생하는 문제가 있다.

본 연구에서의 100kW급의 대용량 급속충전장치는 서브(Sub) 모듈을 4병렬로 운전하고 있으며, 입력단 전류 불균형으로 인한 중성선(n상)에 부족한 불평형 전류 발생, 노이즈 증가, 무효전력 증가, 유효전력 감소, 역률 및 효율이 나빠지는 기본적인 문제가 발생되고 있으며, 이의 효과적인 해결방안으로 전기자동차 급속충전장치에서 지그재그(Zig-Zag) 필터 적용을 제안하고자 한다. 지그재그 필터의 적합한 설계를 통하여 100kW급의 대용량 급속충전장치에서 전부하(Full Load) 기준으로 최고효율 95.632%의 고효율로 동작시킬 수 있었으며, 각 상 및 중성선(n상)에 고조파 노이즈를 저감시키기 때문에 무효전력 감소, 유효전력 증가 및 역률이 상승되는 효과를 종합적으로 확인하고자 한다.

본 연구는 전기자동차 급속충전장치에서 지그재그(Zig-Zag) 필터 적용의 타당성을 확인하기 위하여 100kW급 급속충전 시스템을 기반으로 부하(Load) 및 전기자동차 실차 충전 실험을 통하여 그 타당성에 대하여 논의하고자 한다.

2. 3상 4선식 지그재그 필터가 적용된 전기자동차 급속충전장치

그림 1은 100kW급 전기자동차 급속충전장치에 적용된 지그재그(Zig-Zag) 필터의 구조도를 나타낸다.

가장 일반적인 지그재그(Zig-Zag) 필터는 1 D : 1 D 두께로 권취(Winding)하는 방식을 사용하고 있다[4-5, 15-16, 18]. 보다 우수하게 고조파 전류의 보상을 위해서는 필터의 레그(Leg)에 2개 이상의 다(多)권선을 교차시킨 지그재그(Zig-Zag) 권선이 더욱 효과적이다.

다(多)권선을 교차시킨 지그재그(Zig-Zag) 권선의 경우 위상을

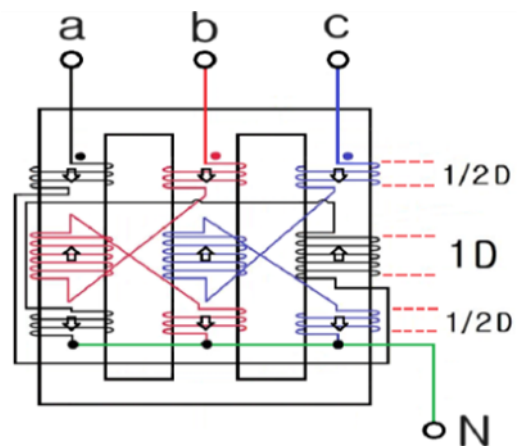


그림 1 지그재그 필터 구조
Fig. 1 Zig-Zag Filter Structure

더욱 정밀하게 제어가 가능하고, 불평형 부하에서 발생하는 고조파 전류의 보상에 더욱 우수한 장점이 있지만, 지그재그(Zig-Zag) 필터의 제작에 비용이 상승하는 문제점 있다[20-21]. 본 논문에서는 전기자동차 급속충전기에서 불평형 보상 성능과 경제성을 모두 고려하여 1/2 D : 1 D : 1/2 D 두께로 권취(Winding)하는 방식으로 지그재그(Zig-Zag) 필터를 설계하고 전기자동차 급속충전장치에 적용하였다.

본 연구에서 설계된 지그재그 필터는 a상-c상-a상 / b상-a상-b상 / c상-b상-c상으로 권선이 인접한 상으로 이어지는 권선의 구조를 가지고 있다. 이는 첫째, 특정(特定) 상(Phase)의 시작권선을 1/2 D 두께로 권취(Winding)하고, 둘째, 이웃 상(Phase)에서는 1 D 두께로 권취(Winding)하고, 셋째, 다시 특정(特定) 상(Phase)이 마감권선을 1/2 D 두께로 권취(Winding)하고, 넷째 모든 마감권선은 중성선 n상(Phase)과 연결하는 것을 100kW급 전기자동차 급속충전기의 입력단에 연결하였다.

그림 2는 지그재그(Zig-Zag) 필터의 결선도를 나타낸다. 지그재그 필터의 결선 a상/ b상/ c상 모두 인접한 상으로 이어지는 권선의 구조이며, 모든 마감은 중성선 n상(Phase)과 연결된다. 이렇게 지그재그(Zig-Zag) 필터가 인접한 상으로 연결됨으로써 인해서 특정(特定) 상(Phase)에 발생하는 노이즈를 이웃 상(Phase)으로 분산하는 특성을 가지며, 동시에 중성선(n상)에 노이즈를 저감시키는 장점을 가지게 된다.

그림 3은 지그재그 필터의 위상도(Phase diagram)를 나타낸다. 지그재그 필터의 위상을 벡터(Vector)를 기준으로 표현하면, 각 상의 위상의 변화가 지그재그(Zig-Zag) 형상으로 나타나게 된다. 3상 4선식 시스템에서 매우 이상적이라고 가정하면, 각 상의 영상분 전류(Zero-Sequence Current)는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$i_{na} + i_{ca} = -i_{ba} \quad (1)$$

$$i_{nb} + i_{ab} = -i_{bc}$$

$$i_{nc} + i_{bc} = -i_{ac}$$

중성선 전류 $i_n(t)$ 는 각 상의 영상분 전류의 합으로 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$i_{za} = \frac{1}{3} i_{zn} \quad (2)$$

지그재그(Zig-Zag) 필터의 권선비를 1/2 : 1 : 1/2의 권선비로 가정하면 이상적인 경우 지그재그 필터의 상전류는 i_{zn} 의 1/3의 전류가 흐르게 되고 이상적인 경우, 지그재그 필터의 전류는 식 (3)과 같이 모두 동일하게 된다.

$$i_{za} = i_{zb} = i_{zc} \quad (3)$$

지그재그(Zig-Zag) 필터는 각 상의 불평형이 발생시 영상분

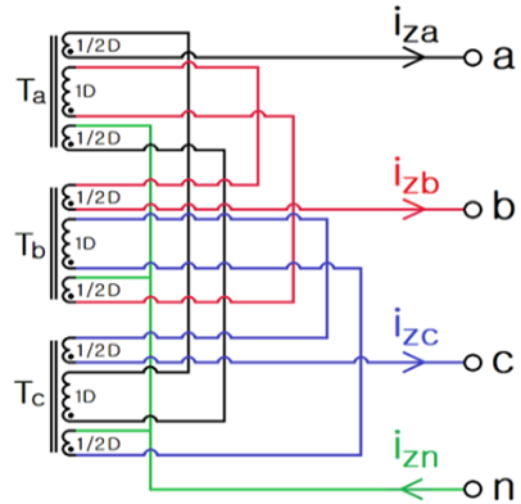


그림 2 지그재그 필터 회로 연결

Fig. 2 Zig-Zag Filter Circuit Connection

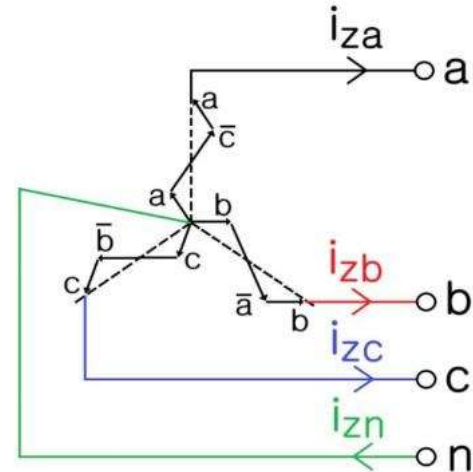


그림 3 지그재그 필터의 위상

Fig. 3 Phase Diagram for Zig-Zag Filter

전류(Zero-Sequence Current)를 공급하는 전원(Source)으로 사용되며, 각 상의 불평형 전류를 보상할 수 있는 특징을 가지고 있다.

그림 4는 3상 4선식 지그재그 필터를 적용한 전기자동차 급속충전장치를 나타낸다.

3상 4선식 전원의 입력단에 그림 1 및 그림 2의 지그재그 필터를 배치하였으며, 전원단에 입력된 서지(Surge)를 보호하기 위하여 서지보호기(Surge Protector)를 배치하였다. 3상 AC-DC 컨버터를 통하여 DC 400 V를 출력하며, 상기 DC 400 V의 출력을 받아서 4병렬의 30kW급 풀브리지 DC-DC 컨버터(Full-Bridge DC-DC Converter)로 전력이 공급되고, 초기 과전류 제한을 위한 릴레이(Relay) 회로를 통하여 전기자동차(EV)를 충전한다.

3상 AC-DC 컨버터는 IGBT를 사용하여 3상 H-브리지 방식으로 설계하였으며, 초기 과전류 제한 릴레이 회로(inrush current control relay circuit)는 4개의 릴레이 회로 및 제어부로

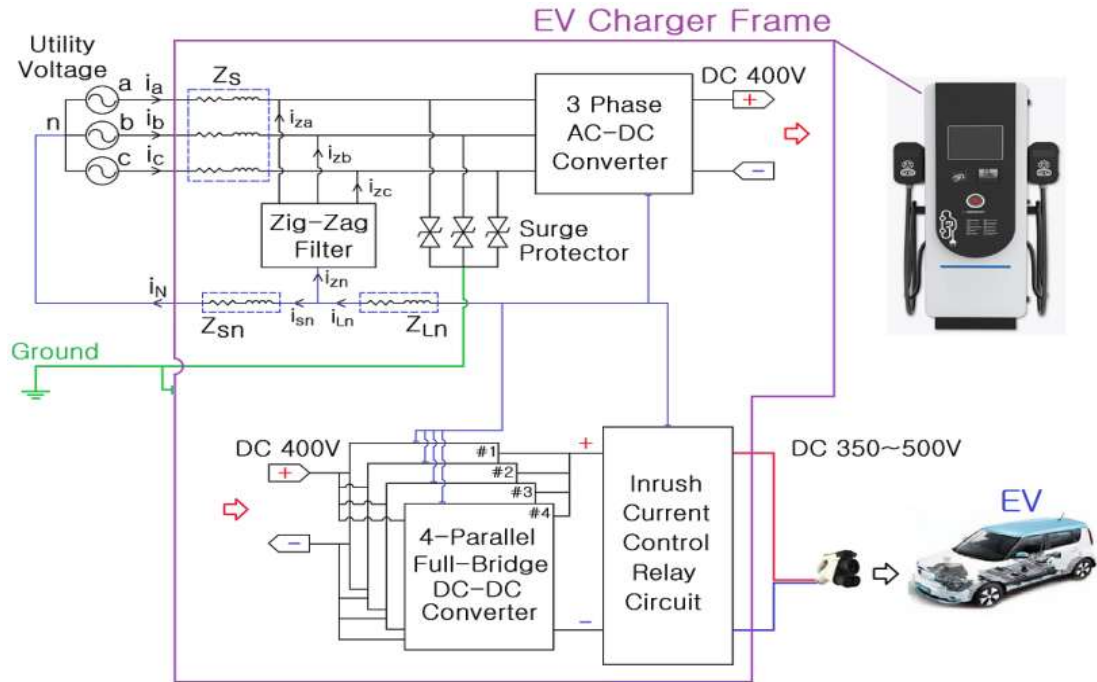


그림 4 3상 4선식 지그재그 필터가 적용된 전기자동차 급속충전기

Fig. 4 EV Faster Charger with 3-Phase 4-Wire Zig-Zag Filter

구성되어 있으며, 전기자동차의 배터리에 급격하게 전류가 흐르지 않도록 제한하는 특성을 가지고 있다. 릴레이 회로는 4 병렬 풀브리지 컨버터(4-Parallel Full-Bridge Converter)와 연동되어 전기자동차 배터리 충전 시 초기 과전류를 제한하며 점차적으로 증가하게 제어되도록 설계하였다.

불평형 전원에 의한 영상분 전압은 v_{s0} 이며, 불평형 3상 전압을 v_{an} , v_{bn} , v_{cn} 라고 정의하면, 다음과 같은 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} V_{s0} \\ V_{s1} \\ V_{s2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서

$$a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} = e^{j\frac{2\pi}{3}}$$

$$a^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} = e^{j\frac{4\pi}{3}}$$

$$a^3 = 1$$

$$a^2 + a + 1 = 0$$

따라서 영상분 전압은 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$v_{s0} = \frac{1}{3} [v_{an} + v_{bn} + v_{cn}] \quad (5)$$

그림 5는 영상분 등가회로를 나타낸다. 그림 5로부터 불평형 전원단에 대한 영상분 전류는 다음의 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$i_{Ln} = \frac{1}{3} [i_{La} + i_{Lb} + i_{Lc}] \quad (6)$$

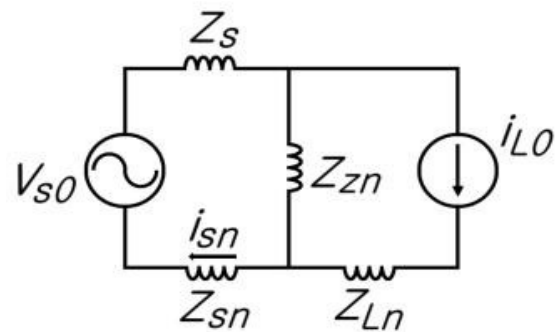


그림 5 영상분 등가회로

Fig. 5 The Zero-sequence Equivalent Circuit

그림 5에서 Z_{zn} 은 지그재그 필터의 영상분 임피던스를 나타내며, 지그재그 필터에서 i_{L0} 를 바탕으로 중성선 전류 i_{sn} 는 다음의 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$i_{sn}' = \frac{Z_{sn}}{Z_s + Z_{sn} + Z_{zn}} i_{L0} \quad (7)$$

또한 v_{s0} 를 바탕으로 중성선 전류 i_{sn} 는 다음의 식 (8)과

같이 나타낼 수 있다.

$$i_{sn}' = \frac{1}{Z_S + Z_{sn} + Z_{zn}} v_{s0} \quad (8)$$

따라서 중성선 전류 i_{sn} 는 다음의 식 (9)로 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} i_{sn} &= i_{sn}' + i_{sn}'' \\ &= \frac{Z_{sn}}{Z_S + Z_{sn} + Z_{zn}} i_{Ln} + \frac{1}{Z_S + Z_{sn} + Z_{zn}} v_{s0} \\ &= \frac{1}{Z_S + Z_{sn} + Z_{zn}} [Z_{sn} i_{Ln} + v_{s0}] \end{aligned} \quad (9)$$

식 (9)로부터 Z_S 및 Z_{sn} 은 고정된 값이므로 변화시킬 수 없으며, 지그재그 필터(Zig-Zag)의 설계를 통하여 Z_{zn} 의 크기를 증가시킬 수 있다. 이를 바탕으로 중성선 전류 i_{sn} 을 줄일 수 있는 특징이 있다. 본 연구에서는 중성선 전류 i_{sn} 을 최대한 줄이기 위해서 지그재그 필터의 영상분 영상분 임피던스 Z_{zn} 을 식 (10)의 조건으로 설계하였다.

$$Z_{zn} \gg Z_S + Z_{sn} \quad (10)$$

$Z_{zn} = R_{zn} + jL_{zn}$ 으로 나타낼 수 있으며, $R_{sn} = 47 \Omega$, $L_{sn} = 1.7 H$ 로 설계 및 제작하였다. 이를 통하여 100kW급 전기자동차 급속충전장치에서 중성선 불평형 전류를 효과적으로 저감시킬 수 있다.

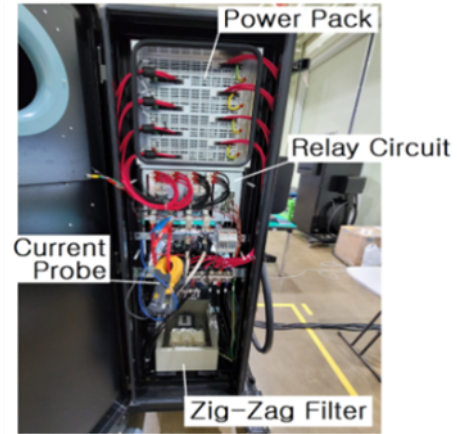
3. 실험 결과

그림 6은 100kW급 전기자동차 급속충전장치 실험장치를 나타내며, 표 1은 전기자동차 급속충전장치에 사용된 소자와 회로 파라미터를 나타낸다.

100kW급 전기자동차 급속충전장치에서 3상 4선식 지그재그 필터의 적용성에 대한 타당성을 검증하기 위하여 입력 3상 4선식 AC 380 V, 출력 DC 400~500 V, 200 A의 급속충전장치와



(a) Experimental Apparatus for EV Fast Charger



(b) Backside of EV Fast Charger



(c) EV Charging Test



(d) Zig-Zag Filter

그림 6 실험장치
Fig. 6 Experimental Apparatus

표 1 전기자동차 급속충전장치의 파라미터
Table 1 Elements and circuit parameters in the Fast Charger

Name (Symbol)	Specifications
Input Voltage (V_{in})	AC 380 [V]
Output Voltage (V_o)	DC 400 ~ 500 [V]
Maximum Power (P_o)	100 [kW]
Main Switch of 3 Phase AC-DC Converter	IKW75N65EH5, INFINEON (600V, 75A, 3-Parallel, IGBT)
Output Capacitor of 3 Phase AC-DC Converter	6,960 [μ F]
Main Switch of Full-Bridge Converter	IPW65R041CFD, INFINEON (700V, 68.5A, 2-Parallel, MOSFET)
Output Capacitor of Full-Bridge Converter	1,064 [μ F]

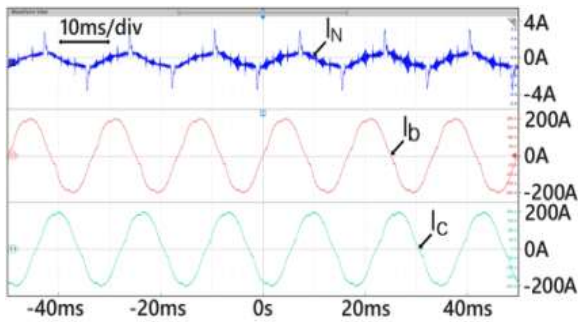
Transformer of Full-Bridgd Converter	PQ5050. TDK $N_p : N_s = 18 : 18$, $L_{lk} = 3 [\mu F]$
Rectifier Diode of Full-Bridgd Converter	IDW100E60FKSA1, INFINEON (600V, 100A, 3-Parallel)
Output Relay	GPR250, LS (450V, 250A, 3-Parallel)
Resistance of Zig-Zag Filter	47 [Ω]
Inductance of Zig-Zag Filter	1.7 [H]
Switching Frequency of 3 Phase AC-DC Converter	50 [kHz]
Switching Frequency of Full-Bridgd Converter	150 [kHz]

200kW급의 부하 및 60kWh급 배터리 용량의 기아자동차 소울(Soul) 전기자동차를 대상으로 실험을 수행하였다.

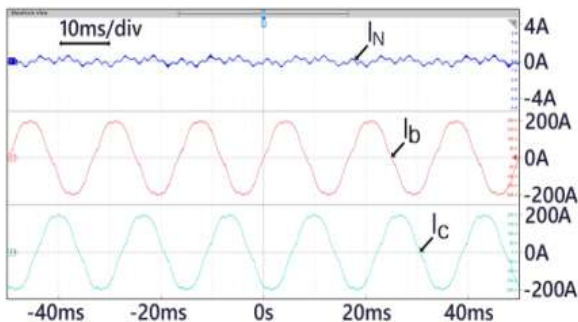
그림 7 내지 그림 9는 지그재그(Zig-Zag) 필터의 유·무(有·無)에 따른 N상, b상, c상 전류를 나타낸다.

그림 7로부터 전기자동차 급속충전장치가 100kW급 출력에서 지그재그(Zig-Zag) 필터가 있는 경우, 중성선(Neutral Point)에 뽀족한 불평형 전류가 완만해지며, 중성선(N상)의 불평형 전류의 피크(I_{pp})가 77.42% 저감됨을 확인할 수 있었다.

100kW급 출력에서 지그재그(Zig-Zag) 필터의 유·무(有·無)



(a) Without Zig-Zag Filter



(b) With Zig-Zag Filter

그림 7 100kW에서 N상, b상, c상 전류
Fig. 7 N-phase, b-phase, and c-phase Current at 100kW

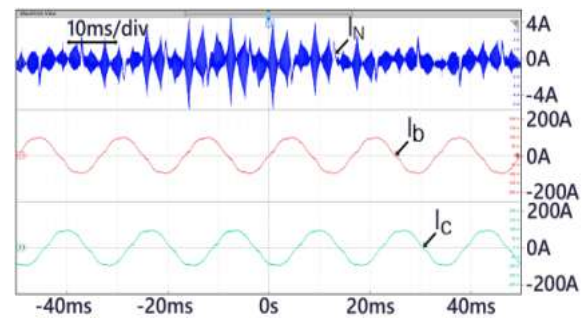
無)에 따른 결과는 다음과 같다.

- 100kW (without Filter) : $I_{pp} = 6.2 \text{ A}$
- 100kW (with Filter) : $I_{pp} = 1.4 \text{ A}$

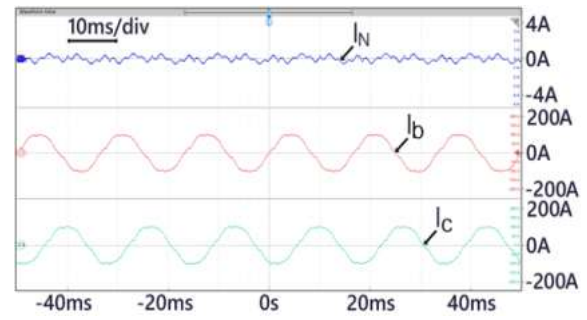
그림 8로부터 전기자동차 급속충전장치가 50kW급 출력에서 지그재그(Zig-Zag) 필터가 있는 경우, 중성선(Neutral Point)에 뽀족한 불평형 전류가 완만해지며, 중성선(N상)의 불평형 전류의 피크(I_{pp})가 88.57% 저감됨을 확인할 수 있었다.

50kW급 출력에서 지그재그(Zig-Zag) 필터의 유·무(有·無)에 따른 결과는 다음과 같다.

- 50kW (without Filter) : $I_{pp} = 10.5 \text{ A}$
- 50kW (with Filter) : $I_{pp} = 1.2 \text{ A}$



(a) Without Zig-Zag Filter



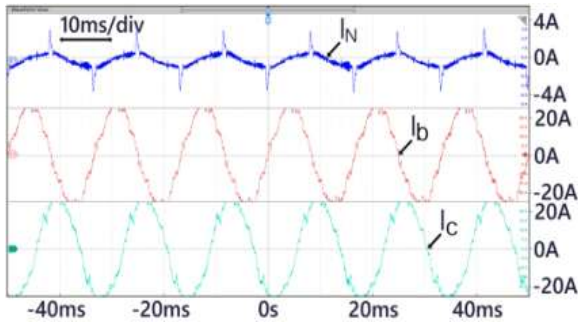
(b) With Zig-Zag Filter

그림 8 50kW에서 N상, b상, c상 전류
Fig. 8 N-phase, b-phase, and c-phase Current at 50kW

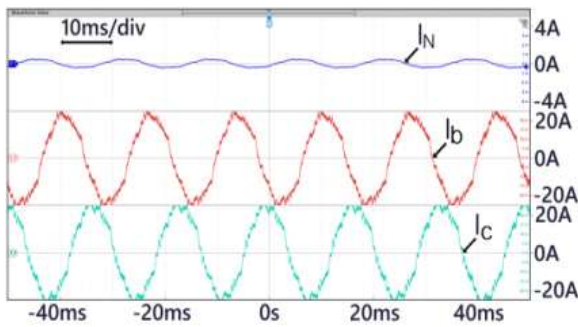
그림 9로부터 전기자동차 급속충전장치가 10kW급 출력에서 지그재그(Zig-Zag) 필터가 있는 경우, 중성선(Neutral Point)에 뽀족한 불평형 전류가 완만해지며, 중성선(N상)의 불평형 전류의 피크(I_{pp})가 84.85% 저감됨을 확인할 수 있었다.

10kW급 출력에서 지그재그(Zig-Zag) 필터의 유·무(有·無)에 따른 결과는 다음과 같다.

- 10kW (without Filter) : $I_{pp} = 6.6 \text{ A}$
- 10kW (with Filter) : $I_{pp} = 1.0 \text{ A}$



(a) Without Zig-Zag Filter



(b) With Zig-Zag Filter

그림 9 10kW에서 N상, b상, c상 전류

Fig. 9 N-phase, b-phase, and c-phase Current at 10kW

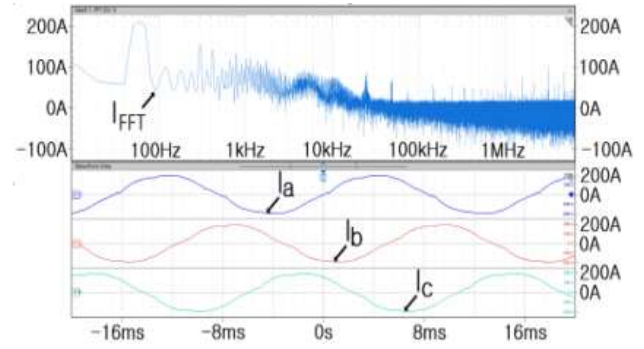
표 2는 지그재그(Zig-Zag) 필터의 유·무(有·無)에 따른 중성선 불평형 전류 및 저감비율을 정리한 것이다.

표 2 지그재그(Zig-Zag) 필터 사용에 따른 중성선 불평형 전류 및 저감비율
Table 2 Neutral Unbalance Current and Reduction Ratio by Zig-Zag Filter

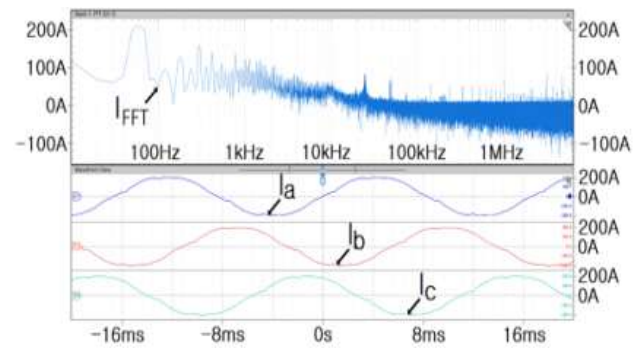
Output Power	Neutral Unbalance Current		Reduction Ratio
100kW	With Filter	$I_{pp} = 6.2 \text{ A}$	77.42 %
	Without Filter	$I_{pp} = 1.4 \text{ A}$	
50kW	With Filter	$I_{pp} = 10.5 \text{ A}$	88.57 %
	Without Filter	$I_{pp} = 1.2 \text{ A}$	
10kW	With Filter	$I_{pp} = 6.6 \text{ A}$	84.85 %
	Without Filter	$I_{pp} = 1.0 \text{ A}$	

본 논문에서 사용된 지그재그(Zig-Zag) 필터의 영상분 영상분 임피던스 $Z_{zn} = R_{zn} + jL_{zn} = 47 + j17 [\Omega]$ 이며, 3상 전원 측의 임피던스 Z_S 와 비교하여 상대적으로 높게 설계함을 통하여 중성선 불평형 전류를 저감시킬 수 있었다.

그림 10은 지그재그(Zig-Zag) 필터의 유·무(有·無)에 따른 전류 FFT(Fast Fourier Transform), a, b, c상의 전류 파형을 나타낸다. FFT의 결과 지그재그(Zig-Zag) 필터가 없는 경우와 비교해서 있는 경우에는 100Hz로부터 10kHz까지 노이즈 레벨(Level)이 상대적으로 낮게 된다. 이를 주파수에 따라서 노이즈



(a) Without Zig-Zag Filter



(b) With Zig-Zag Filter

그림 10 100kW에서 전류 FFT, a상, b상, c상 전류

Fig. 10 Current FFT a, b, c-phase Current at 100kW

레벨의 감소 비율을 보다 자세하게 분석하면 100Hz에서는 2.38%, 1kHz에서는 52.50% 및 10kHz에서는 60.02%의 노이즈 레벨이 저감되는 것을 FFT 결과로 확인할 수 있었다.

그림 11은 전기자동차 기아 소울 EV를 충전시 입력의 a, b, c 상의 전류파형을 나타낸다. 전기자동차 배터리 충전이 진행됨에 따라서 a, b, c 상의 전류 레벨이 점차적으로 줄어들며 안정적으로 동작함을 확인하였다.

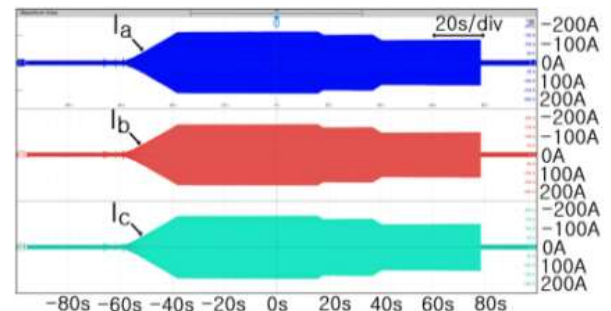


그림 11 전기자동차 충전시 a, b, c상 전류

Fig. 11 a, b, c-phase Current when Charging EV

그림 12는 100kW급 전기자동차 급속충전장치에서 지그재그(Zig-Zag) 필터의 유·무(有·無)에 따른 효율을 비교한 것이다. 지그재그(Zig-Zag) 필터의 적용은 100kW의 전부하(Full Load)에서 1.3%의 효율향상을 이룰 수 있으며, 5kW의 경부하(Light Load)에서는 5.13%의 효율향상을 이룰 수 있으며, 최고

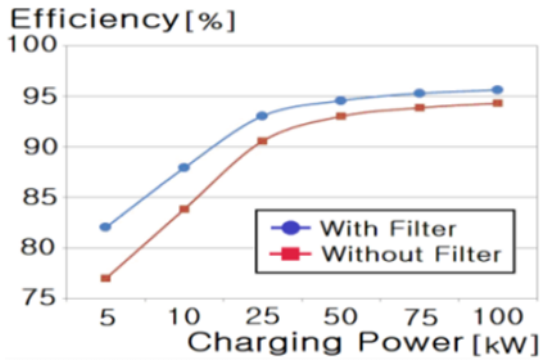


그림 12 효율 비교
Fig. 12 Efficiency Comparison

효율은 100kW의 전부하(Full Load)에서 95.632%로 고효율로 동작하는 전기자동차 급속충전장치를 이룰 수 있었다.

그림 13는 전기자동차 기아 소울 EV를 지그재그(Zig-Zag) 필터가 있는 100kW급 전기자동차 급속충전장치에서 충전시 전기자동차 배터리 전압, 전류 및 효율을 측정한 것이다. 전기자동차 배터리를 총 179분 동안 충전했으며, 전기자동차 배터리가 350V에서 412V까지 충전되었으며, 고효율 특성이 나타남을 실험적으로 확인할 수 있었다.

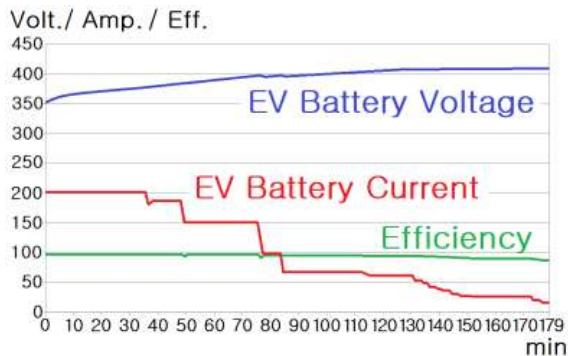


그림 13 전기자동차 충전 테스트(기아 Soul EV)
Fig. 13 EV Charging Test (KIA Soul EV)

4. 결론

본 논문에서는 100kW급 전기자동차 급속충전장치에서 3상 4선식 지그재그(Zig-Zag) 필터의 적용에 대하여 논하였다. 지그재그(Zig-Zag) 필터는 3상 4선식 전력시스템에서 각 상에서 발생하는 고조파 노이즈 저감 및 중선선(Neutral Point)에서 불평형 전류를 저감시키는 것을 확인하였다.

100kW급의 대용량 급속충전장치는 30kW급 4병렬로 연결된 전력변환장치로 인하여, 입력단에서 전류 불균형으로 인하여 중성선(n상)에 땀족한 불평형 전류가 발생하며 이로 인하여 1) 고조파 노이즈 증가 2) 역률감소 3) 무효전력 증가 4) 유효전력 감소 5) 효율감소 및 6) 전자파 발생 등 문제점을 발생시키고 있었다.

전기자동차 급속충전장치에서 발생하는 전자파 노이즈의 문제는 충전장치의 고장 및 이상현상에 대한 가장 큰 문제점이

있으며, 이를 해결하기 위해서 전기자동차 급속충전장치에 지그재그(Zig-Zag) 필터의 적용하여서 100% 부하(Full-Load) 기준으로 77.42% 중성선(n상) 불평형 전류를 저감시키며, 100Hz에서 10kHz까지 노이즈 레벨(Level)을 전반적으로 저감시키며, 10kHz 기준 60.02%의 노이즈를 감소시킨다는 것을 FFT(Fast Fourier Transform) 분석을 통해서 확인하였다. 따라서 전기자동차 급속충전장치에서 지그재그(Zig-Zag) 필터 필터의 적용은 중성선(n상)의 고조파(Harmonics) 전류저감, 무효전력 감소, 유효전력 증가하는 장점이 있다. 아울러 전기자동차 급속충전장치의 효율도 100kW의 전부하(Full Load)에서 1.3%, 5kW의 경부하(Light Load)에서는 5.13%의 향상을 이루게 되었다. 따라서 본 연구에서 100kW급 전기자동차 급속충전장치의 최고 효율은 전부하(Full

Load)에서 95.632%가 됨을 실측하였고, 대용량 전기자동차 급속충전장치에서 지그재그(Zig-Zag) 필터 적용의 타당성에 대하여 실차 충전 실험을 통하여 확인할 수 있었다.

기호설명

D : 지그재그(Zig-Zag) 필터의 권선두께

i_{a0} : a상의 영상분 전류

i_{b0} : b상의 영상분 전류

i_{c0} : c상의 영상분 전류

i_{La} : 불평형 a상 전류

i_{Lb} : 불평형 b상 전류

i_{Lc} : 불평형 c상 전류

i_{Ln} : 지그재그(Zig-Zag) 필터 후단의 불평형 전원단에 대한 영상분 전류

$i_n = i_{sn}$: 중성선 전류

i_{za} : a상으로 공급되는 지그재그(Zig-Zag) 필터 전류

i_{zb} : b상으로 공급되는 지그재그(Zig-Zag) 필터 전류

i_{zc} : c상으로 공급되는 지그재그(Zig-Zag) 필터 전류

i_{zn} : n상과 연결된 지그재그(Zig-Zag) 필터 전류

R_{zn} : 지그재그 필터의 영상분 임피던스의 저항 성분

L_{zn} : 지그재그 필터의 영상분 임피던스의 인덕터 성분

v_{an} : 불평형 a상 전압

v_{bn} : 불평형 b상 전압

v_{cn} : 불평형 c상 전압

v_{s0} : 불평형 전원에 의한 영상분 전압

Z_S : 3상 전원 측의 임피던스

Z_{sn} : 중성선에서 전원 측의 임피던스

Z_{Ln} : 중성선에서 부하 측의 임피던스

Z_{zn} : 지그재그 필터의 영상분 임피던스

Acknowledgements

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF), the Ministry of Education (MOE), and Suwon University Academic Promotion Research Grant.

References

- [1] Hyunjae Yoon and Insu Kim, "A Study on the Administrative Efficiency for Electric Vehicle Charging Station Expansion in South Korea," The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers, vol. 73, no. 10, pp. 1724-1731, 2024.
DOI:10.5370/KIEE.2024.73.10.1724
- [2] Jun-Gi Kim and Il-Yop Chung, "Optimal Electric Vehicle Scheduling Method Using Renewable Energy Forecasting Algorithm in DC Nanogrid," The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers, vol 69, no. 6, pp. 808-820, 2020.
DOI:10.5370/KIEE.2020.69.6.808
- [3] Pedro Rodríguez, J. Ignacio Candela, Alvaro Luna, Lucian Asiminoaei, Remus Teodorescu and Frede Blaabjerg, "Current Harmonics Cancellation in Three-Phase Four-Wire Systems by Using a Four-Branch Star Filtering Topology," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 24, no. 8, pp. 1939-1950, 2009.
DOI:10.1109/TPEL.2009.2017810
- [4] William A. Lewis, "Current Transformer Connection for Relay Operation," US Patent 1877139, pp. 1-5, 1932.
- [5] Prem P. Khera, "Application of Zigzag Transformers for Reducing Harmonics in the Neutral Conductor of Low Voltage Distribution System," IEEE Industry Application Society Annual Meeting, Seattle, WA, USA, 06, Aug. 2002.
DOI:10.1109/IAS.1990.152320
- [6] Tadashi Fukami, Toshinari Onchi, Nobuyuki Naoe and Ryoichi Hanaoka, "Compensation for Neutral Current Harmonics in a Three-Phase Four-Wire System by a Synchronous Machine," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 38, no. 5, pp. 1939-1950, 2002.
DOI:10.1109/TIA.2002.802923
- [7] P. Enjeti, W. Shireen, P. Packebush and I. Pitel, "Analysis and Design of a New Active Power Filter to Cancel Neutral Current Harmonics in Three Phase Four Wire Electric Distribution Systems," IEEE Industry Application Conference Twenty-Eight IAS Annual Meeting, pp. 939-946, 1993.
DOI:10.1109/IAS.1993.299011
- [8] Girish Kamath and Ned Mohan, "A Novel, Reduced Rating Active Filter for 3-Phase, 4-Wire Loads," IEEE Industry Application Society Annual Meeting, pp. 936-940, 1994.
DOI:10.1109/IAS.1994.377530
- [9] Bhim Singh, P. Jayaprakash and D. P. Kothari, "A T-Connected Transformer and Three-leg VSC Based DSTATCOM for Power Quality Improvement," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 23, no. 6, pp. 2710-2718, 2008.
DOI:10.1109/TPEL.2008.2004273
- [10] P. Jayaprakash, Bhim Singh and D. P. Kothari, "Three-Phase 4-Wire DSTATCOM Based on H-Bridge VSC with a Star/Hexagon Transformer for Power Quality Improvement," IEEE Region 10 and the Third International Conference on Industrial and Information System, pp. 1-6, 2008.
DOI:10.1109/ICIINFS.2008.4798378
- [11] Sewan Choi and Minsoo Jang, "A Reduced-Rating Hybrid Filter to Suppress Neutral Current Harmonics in Three-Phase Four-Wire Systems," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 51, no. 4, pp. 927-930, 2004.
DOI:10.1109/TIE.2004.831765
- [12] Sewan Choi and Minsoo Jang, "Analysis and Control of a Single-Phase-Inverter-Zigzag-Transformer Hybrid Neutral-Current Suppressor in Three-Phase Four-Wire Systems," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 54, no. 4, pp. 2201-2208, 2007.
DOI:10.1109/TIE.2007.899831
- [13] Yasuyuki Nishida, "A Harmonic Reducing Scheme for 3-Phase Bridge 6-Pulse Diode Rectifier," IECON'99 Conference Proceeding, pp. 228-234, 1999.
DOI:10.1109/IECON.1999.822201
- [14] Bo Liu, Xiaojie Shi, Yalong Li, Fred Wang and Leon M. Tolbert, "A Line Impedance Conditioner for Saturation Mitigation of Zigzag Transformer in Hybrid Ac/Dc Transmission System Considering Line Unbalances," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 32, no. 7, pp. 5070-5086, 2016.
DOI:10.1109/TPEL.2016.2608864
- [15] Hurng-Liahng Jou, Jinn-Chang Wu, Kuen-Der Wu, Wen-Jung Chiang and Yi-Hsun Chen, "Analysis of Zig-Zag Transformer Applying in the Three-Phase Four-Wire Distribution Power System," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 20, no. 2, 1168-1173, 2005.
DOI:10.1109/TPWRD.2005.844281
- [16] Bhim Singh, P. Jayaprakash, Somayajulu and D. P. Kothari, "Reduced Rating VSC With a Zig-Zag Transformer for Current Compensation in a Three-Phase Four-Wire Distribution System," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 24, no. 1, pp. 249-259, 2009.
DOI:10.1109/TPWRD.2008.2005398
- [17] Shenghui Cui, Joon-Hee Lee, Jingxin Hu, Rik W. De Doncker and Seung-Ki Sul, "A Modular Multilevel Converter with a Zigzag Transformer for Bipolar MVDC Distribution Systems," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 34, no. 2, pp. 1038-1043, 2019.
DOI:10.1109/TPEL.2018.2855082
- [18] Hurng-Liahng Jou, Kuen-Der Wu, Jinn-Chang Wu and Wen-Jung Chiang, "A Three-Phase Four-Wire Power Filter Comprising a Three-Phase Three-Wire Active Power Filter and a Zig-Zag Transformer," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 23, no. 1, pp. 252-259, 2008.

DOI:10.1109/TPEL.2007.911779

- [19] Stefani Freitas, Luis Carlos Oliveira, Priscila Oliveira, Bruno Exposto, José Gabriel Pinto and Joao L. Afonso, "New Topology of a Hybrid, Three-Phase, Four-Wire Shunt Active Power Filter," *Energies* vol. 16, no. 1384, pp. 1-28, 2022.
DOI:<https://doi.org/10.3390/en16031384>
- [20] Hoon-Yang Park, "Low loss type hybrid transformer, and manufacturing method thereof," Korea Patent, KR10-1573813, pp. 1-20. 2015.
- [21] Tae-Young Park, Seung-Gyu Park, Kyong Lee and Sung-Hyun Sim, "A study of power quality and energy efficiency improvement on power transformer by zig-zag windings," *KIEE Conference*, pp. 987-988, 2011.

저자소개



배진용(Jin-Yong Bae)

He received B.S., M.S., and Ph.D. from the electrical engineering department of Dongguk university, Seoul, Korea, respectively. He worked as a patent examiner of electric power and semiconductor technology examination division KIPO(Korean Intellectual Property Office). He is currently a professor department of electrical engineering at Suwon University, Korea. His interests include the power converter analysis and optimum design for EV(Electric Vehicle) battery, soft-switching converter and inverter, application, etc.