Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers (2014) 28(8) : 75~81
http://dx.doi.org/10.5207/JIEIE.2014.28.8.075 ISSN 1229-4691(Print) ISSN 2287-5034(Online)

논문 28-8-11

무정전 결상 보상장치에 관한 연구

(A Study on the Uninterruptible Power Open Phase Compensation Device)

송영주* · 오진택 · 김나운 · 신혜영**
(Young-Joo Song · Jin-Tack Oh · Na-Un Kim · Hye-Young Shin)

Abstract

It has been widely accepted that open phase may separate one of the power lines from power supply which is mainly caused by fuse melting, malfunction for source circuit breaker, contact failure, and disconnection under normal operating conditions, and is considered a kind of failure mode during disconnection of neutral wires as well. When open phase occurs, unequal voltage between phase might happen in the unbalanced load connected each phase, and further, depending on conditions of load, malfunction by providing low voltage. Moreover, load could be burned or overheated with overvoltage, which, in turn, can be a contributor to starting fires. Accordingly, in order to clearly overcome these problems, the current study aims to introduce the theory of uninterruptible power open phase compensation device, meaning that unbalanced power automatically restores balanced power and provides continuously the power supply without blackout, and verify it through simulation and experiments.

Key Words : Open phase, Compensation device, Power balance

1. 서 론

최근 건축물 · 산업설비의 대형화, 고층화, 지중화와 함께 고도의 정보통신사회로 발전함에 따라 전기의 사용은 점점 더 증가되고 있으나 이로 인한 화재 또한 많이 발생되고 있고 그 피해 역시 날로 증가하고 있다. 이러한 전기화재는 절연열화, 과부하/과전류, 접촉 불량, 단락 사고가 전체 전기사고의 50% 이상을 차지하고 있으며, 이러한 사고의 주요원인중 하나가 결상으로 인한 불평형 전압과 전류로 분석되었다[1-4].

결상은 정상운전 상태에서 퓨즈의 용단, 전원 측

* 주저자 : 동신대학교 소방행정학과 교수
** 교신저자 : 홍익대학교 일반대학원 전기공학과 박사수료
* Main author : Professor, Department of Fire Administration, Dongshin University
** Corresponding author : Ph.D.student, Department of Electrical Engineering, Graduate school, Hongik University
Tel : 061-330-3563, Fax : 061-330-3568
E-mail : dewangel1@dreamwiz.com
접수일자 : 2014년 4월 24일
1차심사 : 2014년 4월 29일, 2차심사 : 2014년 6월 23일
심사완료 : 2014년 6월 29일

Copyright ⓒ 2014 KIIEE All right's reserved

차단기의 오작동, 접촉 불량, 단선 등에 의하여 전력선 3선중 1선이 전원에서 분리되거나 중성선 단선 시 발생되는 고장형태로 결상이 발생되면 부하가 적게 연결된 상에는 과전압이 인가되어 부하가 소손되거나 화재가 발생될 수 있으며 반대로 부하가 많이 연결된 상에는 저전압이 인가되어 기기의 오작동이 발생될 수 있다[5]. 이런 결상사고를 방지하기 위해 최근까지 사용되고 있는 기술은 결상 계전기 또는 결상 차단기를 이용하는 방법으로 선로의 과전압, 과전류를 검출하여 차단기를 동작시키는 것으로 부하가 소손되는 문제점은 어느 정도 해결할 수 있다[6-8].

그러나 결상 계전기 또는 결상 차단기의 동작으로 상용전원이 차단되면 예고 없이 발생되는 정전으로 인해 우리 생활에 큰 불편을 야기하고 그 피해를 예측할 수 없는 2차적인 문제점을 가지고 있다. 특히 화재 시 사용되는 소방부하인 경우 무정전으로 일정시간 동안 연속해서 전원을 공급해주어야 하므로 안전한 비상전원 시스템 구축 없이 결상 시에 상용전원을 차단하는 방식인 결상 계전기나 결상 차단기를 이용하는 방식은 매우 위험한 방법이다.

따라서 본 논문에서는 이러한 문제점을 극복하기 위해 전력선 결상 또는 중성선 단선 시 각 상별 전력 불평형을 전력 평형으로 자동으로 보상[9-11]시키고 정전 없이 연속해서 전원을 공급할 수 있는 무정전 결상 보상장치에 대한 이론을 제시하고 시뮬레이션과 실험을 통해 이것을 검증하고자 한다.

2. 무정전 결상 보상장치

2.1 기초이론

3상 4선식 배전계통에서 R상 결상 시 Y결선 구성도와 벡터도를 나타내면 그림1과 같다. 이때 결상이 되지 않고 전원을 공급하고 있는 나머지 두상(S, T)의 권선에 대해 각각 반대로 권선을 권취해주면 역위상이 발생되고 이 두 역위상을 합하면 결상된 전원을 보상할 수 있다. 즉 T상 권선인 1t와 반대로 권취한 3t 권선의 하나의 단자를 중성선에 연결하여 T상의 반대 위상인 T_1을 생성하고 나머지 하나의 단자를 S상 권선인 1s와 반대로 권취한 2s 권선의 상단에 연결하면 S상의 반대 위상인 S_1을 생성할 수 있으며, 생성된 두 개의 역위상을 벡터적으로 합하게 되면 결상되었던 R상이 자동적으로 보상된다. 이것을 나타내면 그림 2와 같다.

2.2 구성도

무정전 결상 보상장치는 결상을 보상하기 위해 독립된 3개의 레그(leg)가 사용되며 각각의 독립된 레그에는 같은 권수를 가지는 세 개의 권선을 가진다. 즉 3개의 레그에 9개의 권선을 가지는 구조이다[12-14].

각 레그의 첫 번째 권선의 하나의 단자는 AC 전원에 연결되고 다음 레그의 두 번째 권선에 반대로 연결되며 그 다음 레그의 세 번째 권선에도 반대로 연결된다. 그런 다음 중성점을 형성하기 위해 중성선으로 계속 연결된다. 각 레그의 첫 번째 권선의 나머지 하나의 단자도 중성선으로 함께 연결된다. 무정전 결상 보상장치의 결선 회로도와 구성도를 나타내면 그림 3과 같다. 이러한 권선의 설계를 통해 결상이 발생되었을 때 결상이 안 된 두 상의 역위상을 사용하여 결상된 상을 자동적으로 보상할 수 있다.

2.3 벡터도

그림 3의 구성도를 기준으로 결상 보상시의 각 상과 중성선의 전압을 표현하면 수식 (1)과 같고 벡터도[15]를 표현하면 그림 4와 같다.

$$\dot{V}_{rn}(t) = -L\frac{d\dot{i}_r}{dt} = \dot{1}_r = -\dot{3}_t - \dot{2}_s$$

$$\dot{V}_{sn}(t) = -L\frac{d\dot{i}_s}{dt} = \dot{1}_s = -\dot{3}_r - \dot{2}_t$$

$$\dot{V}_{tn}(t) = -L\frac{d\dot{i}_c}{dt} = \dot{1}_t = -\dot{3}_s - \dot{2}_r \quad (1)$$

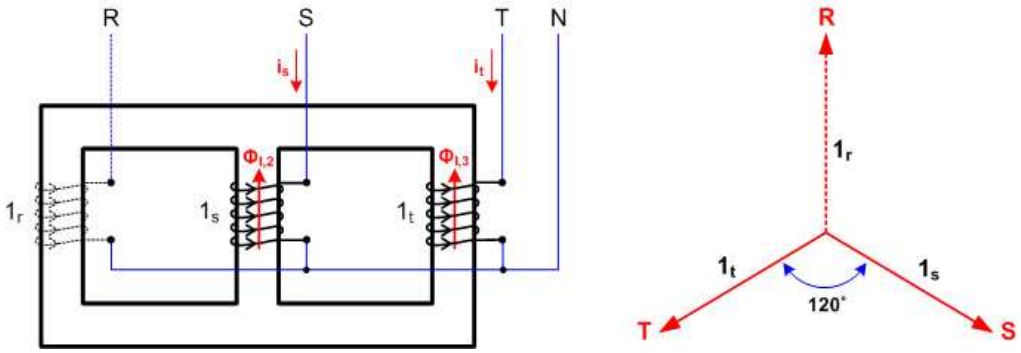


그림 1. R상 결상시의 Y결선 구성도와 부하측 전압 벡터도
Fig. 1. Y-connection configuration and load voltage vector diagram of the R-phase opening

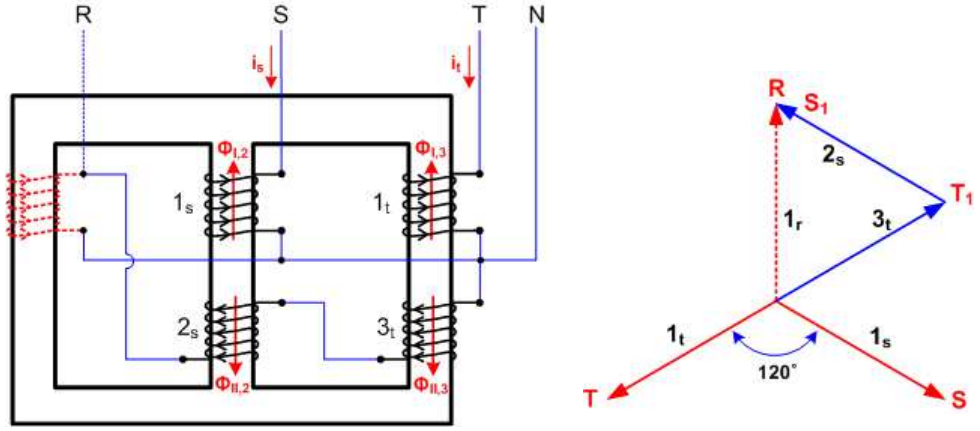


그림 2. R상 결상 보상시의 Y결선 구성도와 부하측 전압 벡터도
Fig. 2. Y-connection configuration and load voltage vector diagram of the R-phase open compensation

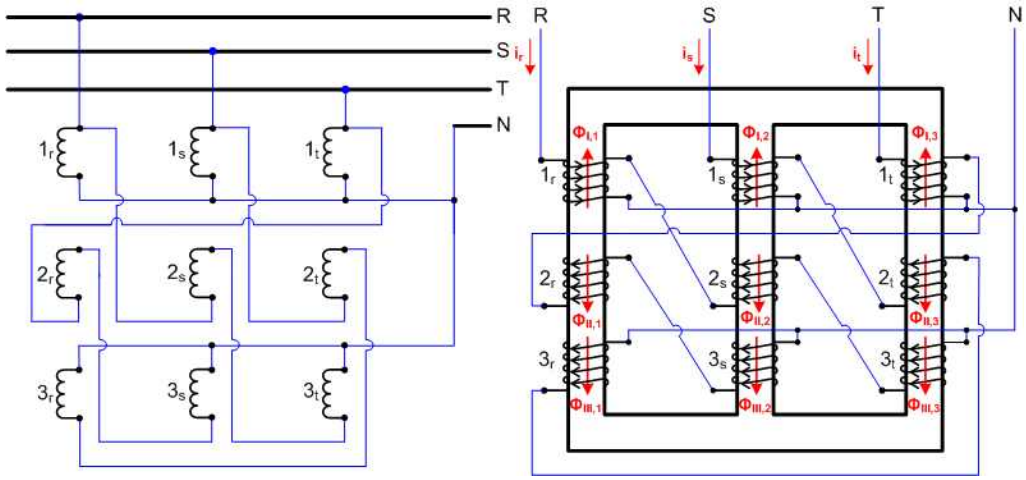


그림 3. 무정전 결상 보상장치의 결선 회로도와 구성도
Fig. 3. Connection circuit and configuration diagram of uninterruptible power open phase compensation device

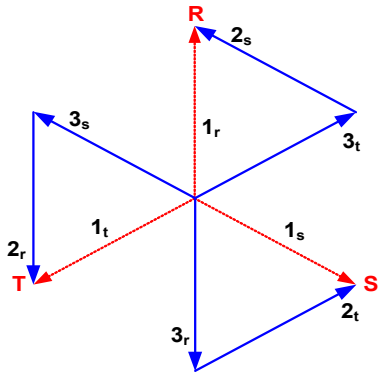


그림 4. 무정전 결상 보상장치의 전압 벡터도
Fig. 4. The voltage vector diagram of uninterruptible power open phase compensation device

3. 시뮬레이션

3.1 모델링

본 논문에서는 PSIM Version 8.0을 이용하여 무정전 결상 보상장치를 모델링하고 배전시스템의 균형부하에 적용하여, 결상 시 결상이 발생된 전원 측과 결상이 자동 보상된 부하 측의 전압, 전류 파형을 비교 분석하여 무정전 결상 보상장치의 성능을 검증하였다.

PSIM에서 무정전 결상 보상장치의 모델링을 위해서 그림 5와 같이 1상 3선식 변압기 3대를 사용하여 1차측은 Y결선하고 2차측은 지그재그 결선을 한 후 중성점을 형성하기 위해 중성선으로 연결시킨 후 R상 결상시의 전원측 전압과 부하측의 전압, 전류 파형을 비교하기 위하여 R상을 결상하였다.

3.2 결상상태

그림 6은 R상 결상 시 전원측의 전압과 부하측의 전압, 전류를 나타낸 것으로 V1r은 전원측 R상 전압, V2r은 부하측 R상 전압, I2r은 부하측 R상의 전류를 나타낸 것이다. 전원측 R상이 결상되어 전원측 R상의 전압이 0이 됨에도 불구하고 무정전 결상 보상장치에 의해 부하측 R상 전압이 자동으로 보상되어 정상적으로 공급되며 R상 전류도 정상적으로 흐르게 되는 것을 알 수 있다.

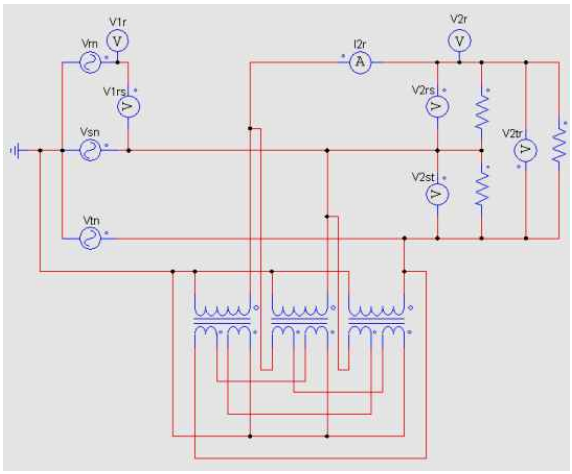


그림 5. 무정전 결상 보상장치의 모델링(R상 결상)
Fig. 5. The modeling of uninterruptible power open phase compensation device (R-phase opening)

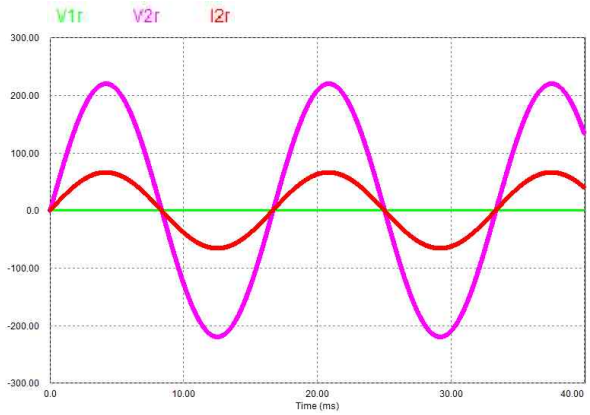


그림 6. 전원측 전압과 부하측의 전압, 전류(R상 결상)
Fig. 6. Source voltage and load voltage, current (R-phase opening)

4. 실험과 결과 분석

4.1 실험방법

그림 7은 실험 구성도로 결상발생을 위한 각 상별 개폐기, 결상을 자동으로 보상하는 결상 보상장치, 결상 전 후의 전압, 전류를 표시하기 위한 전원 측, 부하 측 디지털 전압, 전류 표시장치, 결상 전 후의 전압, 전류 파형을 측정하기 위한 전력분석측정기, 측정 단자대로 구성되어 있다.

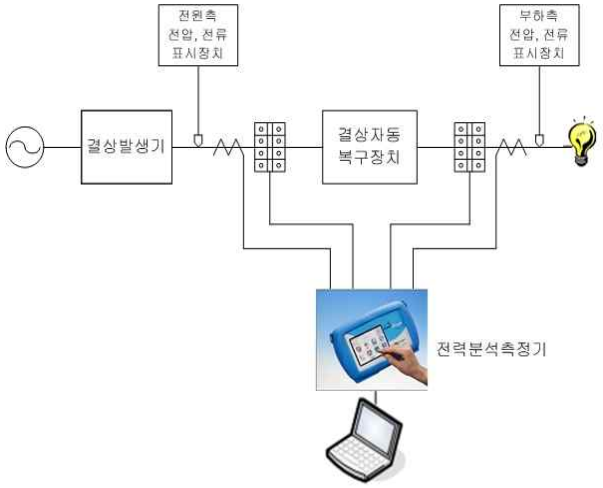


그림 7. 실험 구성도
Fig. 7. The configuration diagram of experiment

실험방법은 3상 4선식 배전계통의 380V 무부하 상태와 60W 평형부하에 한상을 결상시킨 후 결상이 된 전원 측과 결상이 자동 보상된 부하 측의 전압, 전류 값을 Digital Meter로 확인하고, 전력분석측정기를 사용하여 전원 측과 부하 측의 전압, 전류 파형을 측정한다. 결상 순서는 R, S, T상의 순서로 진행한다.

4.2 실험결과

무부하 상태에서의 결상과 결상 보상시의 전압, 전류 값을 정리하면 표 1과 같고, 60W 평형부하 상태에서의 결상과 결상 보상시의 전압, 전류 값을 정리하면 표 2와 같다. 표 1, 2에서 결상은 결상 보상장치의 1차측인 전원 측의 전압, 전류를 의미하며 보상은 결상 보상장치의 2차측인 부하 측의 전압, 전류를 의미한다.

표 1, 2에서 3상 중 한상이 결상되었을 경우 결상 보상장치의 1차측인 전원측의 전류는 0이 되지만 결상 보상장치에 의해 전압은 보상이 되어 정상과 같은 전압이 나타나며, 결상 보상장치의 2차측인 부하측은 결상 보상장치에 의해 전력이 보상되어 전류가 흐르게 되고 3상평형이 이루어지고 있음을 확인할 수 있다.

표 1. 무부하 상태에서의 전압, 전류 값
Table 1. A voltage and current value at no load state

항목 \ 구분		R상		S상		T상	
		결상	보상	결상	보상	결상	보상
선간 전압	R-S	371	372	370	368	371	370
	S-T	369	368	368	371	368	363
	T-R	368	368	368	368	368	366
상 전압	R-N	216	215	216	215	215	215
	S-N	216	216	216	216	215	216
	T-N	216	216	216	216	215	211
상 전류	R	0	0	0.07	0	0.09	0
	S	0.07	0	0	0	0.07	0
	T	0.10	0	0.08	0	0	0

표 2. 60W 평형부하 상태에서의 전압, 전류 값
Table 2. A voltage and current value at 60W balanced load state

항목 \ 구분		R상		S상		T상	
		결상	보상	결상	보상	결상	보상
선간 전압	R-S	370	363	370	359	370	371
	S-T	368	368	367	363	368	355
	T-R	367	358	368	368	368	358
상 전압	R-N	215	205	216	215	215	215
	S-N	215	215	215	205	215	216
	T-N	215	215	215	215	215	202
상 전류	R	0	0.24	0.51	0.24	0.51	0.25
	S	0.51	0.27	0	0.27	0.51	0.27
	T	0.51	0.26	0.49	0.26	0	0.25

표 3과 4는 R상이 결상되었을 경우 결상 보상장치 1차측인 전원측의 전압, 전류 파형과 2차측인 부하측의 전압, 전류 파형을 전력분석측정기로 측정한 값이다. 표 4에서 R상 결상 시 결상 보상장치의 1차측인 전원측의 전류가 흐르지 않지만 결상 보상장치의 2차측인 부하측에는 결상 보상장치에 의해 정전 없이 전류가 보상되어 전류가 연속적으로 흐르는 것을 확인할 수 있다.

표 3. R상의 전압파형
Table 3. A voltage waveform of R-phase

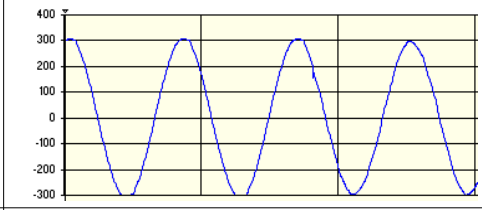
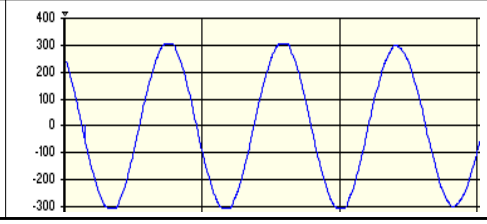
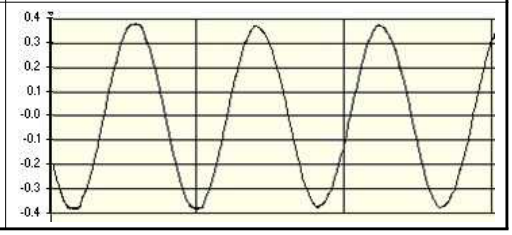
구분	파형
결상	
보상	

표 4. R상의 전류 파형
Table 4. A current waveform of R-phase

구분	파형
결상	
보상	

5. 결 론

본 논문에서는 3상 4선식 배전계통에서 전력선 결상 시 각 상별 전력 불평형을 전력 평형으로 자동 보상시키고 정전 없이 연속해서 전원을 공급할 수 있는 무정전 결상 보상장치에 대한 이론을 제시하였다. 제시된 이론은 결상이 발생되었을 때 결상이 안 된 두 상의 역위상을 사용하여 결상된 상을 자동적으로 보상하는 방식으로 기존의 결상 보호방식인 결상 계전기나 결상 차단기의 예고 없는 정전이나 이로 인한 2차적인 문제점까지 해결할 수 있다. 또한 제시된 무정전 결상 보상장치는 독립된 3개의 레그에 같은 권수를 가지는 9개의 권선을 가지는 구조로 시뮬레이션을 통해 한상이 결상되어도 결상된 상이 자동적으로 보상되는 것을 입증하였으며 무부하 상태와 60W 평형부하 상태에서 R, S, T상의 순차적인 결상 측정 실험을 통해 장치의 신뢰성 또한 검증하였다.

따라서 제시된 무정전 결상 ~~자동보호장치~~ 자동보상장치는 결상으로 인한 과전압, 과전류의 문제점을 해결할 수 있고 전기화재를 최소화 시킬 수 있으며, 이상전압 발생에 의한 전력계통의 불안정한 운전을 해소시켜 각종 전기사고를 미연에 예방할 수 있을 것으로 기대된다.

References

[1] National Fire Alarm Systems, “Fire status statistics”, National Emergency Management Agency, 2013.

[2] Gwi-Young Jo, “A Study on Analysis of Electrical Fire According to the Statistics”, University of Chungju, M.E. Thesis, 2011.

[3] Jong-Ho Lee, Doo-Hyun Kim, Sung-Chul Kim, “Improvement and Analysis for an Electrical Fire Cause Classification”, Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol.23, No.2, pp. 36-40, 2009.

[4] NFPA 901, “Uniform Coding for Fire Protection”, NFPA, 2004.

[5] Yeon-Ho Ok, Eun-Woong Lee, Ill-Hwan Byun, Inn-Soo Kim, Gang-wook Shin, “The Analysis about Effect of Generator on Open Phase in 154kV Line”, Proceedings of KIEE Annual Conference, pp.16-18, 2008.

[6] Shin-Hyeong Choi, Dong-Kurl Kwak, Jin-Hwan Kim, “A Study on Device Development for Electrical Fire Protection on Open Phase of Three-Phase Motor”, Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol.26, No.1, pp 61-67, 2012.

[7] Hyeon-U Kim, Na-Un Kim, “A study on the anti-overvoltage protection system by open phase of three-phase power”, Proceedings of KIFSE Annual Conference, pp.230-231, 2013.

[8] Sang-Ho Lee, Mi-Young Shin, Kyung-Ho Lee, “A Study on Dynamic Characteristics of EFPCD for Conductor Breaks in Low Voltage Wiring”, Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol.18, No.3, pp. 103-107, 2004.

[9] Hurng-Liahng Jou, Jinn-Chang Wu, Kuen-Der Wu, Wen-Jung Chiang, 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, 2005.
〔10〕 Sung-Ho Lee, Gi-Sung Kim, Sang-Bong Yoo, "Development of the New Harmonic Eliminating Device Using Zig-Zag Connection and Open-Delta Mode", Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers Vol. 19, No.1, pp. 169~174, 2005.
〔11〕 Hun-Yang Park, "A study on Power Transformer by Zig-Zag Windings with Reduction of Harmonics and Phase Imbalance", University of Soongsil, M.E. Thesis, 2010.
〔12〕 Chairul Gagarin Irianto, Rudy Setiabudy, and Chairul Hudaya, "Design of Delta Primary - Transposed zigzag Secondary (DTz) Transformer to Minimize Harmonic Currents on the Three-phase Electric Power Distribution System", International Journal on Electrical Engineering and Informatics, Vol. 2, No. 4, 2010.
〔13〕 Hurng-Liahng Joy, 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, 2008.
〔14〕 Bhim Singh, P.jayaprakash, T.R.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, 2009.
〔15〕 Yash Pal, A.Swarup and Bhim Sihgh, "3P-3W UPQC with zig-zag transformer for 3P-4W Distribution System", International Journal on Electrical Engineering and Informatics, Vol.4, No.2, 2012.

◇ 저자소개 ◇

송영주(宋榮柱)
1970년 11월 21일생. 1993년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 1995년 홍익대학교 일반대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년 홍익대학교 일반대학원 전기공학과 졸업(박사). 2009년~현재 동신대학교 소방행정학과 교수

오진택(吳鎭澤)
1969년 3월 3일생. 1992년 순천대학교 전기공학과 졸업. 2010년 한양대학교 공학대학원 전기공학과 졸업(석사). 2013년~현재 한양대학교 공학대학원 전기공학과 박사과정. (주)대명기술단 본부장.

김나운(金나운)
1983년 3월 1일생. 나은에너지 대표.

신혜영(申惠英)
1983년 4월 4일생. 2008년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 2010년 홍익대학교 일반대학원 전기공학과 졸업(석사). 2010년~현재 홍익대학교 일반대학원 전기공학과 박사수료.