

Analysis of Heat Source Distribution in Low Voltage Condenser

김종겸[†] · 이동주^{*} · 김일중^{**} · 박영진^{***}
 (Jong-Gyeum Kim · Dong-Ju Lee · Il-Jung Kim · Young-Jeen Park)

Abstract - In this study, the heat source distributions at the end side and the center of the electrode are analyzed to estimate the electrical stress due to the harmonics from the nonlinear loads. The governing equation at the analysis area of low voltage condenser are numerically solved using the finite element software package to analyze the effects of heat source distribution due to the 5th and 7th harmonics, which can exist normally in the distribution network and can be applied to the low voltage condenser. Finally, the heat source distribution from the harmonics is compared and analyzed with the heat source distribution from the fundamental component of the applied voltage

Key Words : Condenser, Non-linear load, Harmonics, Power factor

1. 서론

저압 배전계통에는 전압에 대해 거의 정현적인 전류파형을 갖는 선형 부하(linear load)뿐만 아니라 정류기, 가변속 제어장치(ASD)와 같이 고조파 성분이 포함되어 있는 비선형 부하(non-linear load)가 많이 사용되고 있다.

콘덴서는 전동기와 같은 유도성 부하에 필요한 무효성분 전력을 전원측을 대신하여 제공하여 전원측 역률을 개선할 뿐만 아니라 주파수가 높아짐에 따라 임피던스가 낮아지는 특성을 이용하여 비선형 부하에서 발생하는 고조파 전류 성분을 흡수하는 필터로 사용되고 있다. 또한 콘덴서는 저압 배전계통에서 부하측 단자 또는 변압기 2차측에 설치되어 역률보상용으로 널리 사용되고 있다. 비선형 부하에서 발생하는 고조파 전류를 저감하기 위해서 수동필터로 사용되는 경우, 비선형 부하장비의 입력부에 설치하는 경우가 일반적이다[1].

그리고 전압파형의 왜형을 경감시키고 콘덴서 투입시의 돌입전류를 억제할 목적으로 콘덴서는 직렬 리액터와 조합하여 사용할 경우 계통 또는 비선형 부하로부터의 고조파를 콘덴서가 흡수하게 된다. 그러나 대부분의 전력전자기기는 전원측에 많은 양의 고조파를 반송하는 비선형 부하로서 그 고조파 전류 성분은 전원측에 위치한 역률보상용 저압 콘덴서에 유입되어 그 수명을 단축시키는 주요한 요인으로 작용

한다[2,3]. 특히, 각 고조파 발생원에서 발생한 고조파 성분들과 여러 고조파 발생원의 조합에 의한 다양한 고조파 성분들에 대한 분석 및 실험적인 검증을 한 바가 있는데 특히, 5고조파와 7고조파 성분에 의한 영향이 큰 것을 확인하였다[2,4].

콘덴서 수명에 영향을 주는 요소로서는 전압, 전류, 그리고 온도 등이 있다. 전압의 증가는 전류의 증가와 관련되며 특히 콘덴서에 고조파의 유입은 전류의 증가와 함께 내부 온도를 높이게 된다. 따라서 콘덴서에 고조파 성분을 포함한 전압의 증가는 콘덴서 수명에 큰 영향을 주기 때문에 이러한 전기적 스트레스를 줄이기 위해서라도 고조파 전압에 의한 특성 해석이 필요하다.

본 연구에서는 저압 콘덴서에 정격전압 및 정격전압의 1.3배 인가시 전기적 스트레스의 1차적인 원인이 되는 변위 전류와 전도전류에 의한 열원 분포를 유한요소해석 소프트웨어[4]를 이용하여 정량적으로 분석하였다. 또한 저압 콘덴서에 주로 유입되는 비선형 부하로부터의 5고조파 성분과 7고조파 성분 인가시 그 콘덴서 내부 열원분포를 해석하고 기본과 인가시의 열원분포와 비교 분석 하였다.

2. 서론

2.1 저압 콘덴서의 내부구성

일반적인 저압 진상용 콘덴서는 그림 1과 같이 내부 전극은 알루미늄 Foil로 구성되어 있고, 유전체는 폴리프로필렌 필름으로 구성되어 있으며 그 매질 특성은 표 1과 같다. 콘덴서에서는 전도전류에 의한 손실과 유전체에서 발생하는 유전손실이 존재하는데 전도전류에 의한 손실은 콘덴서 연결 배선 또는 전극과 같은 저항성 재질에 전류가 흐르면서 발생하는 손실이고, 유전손실은 교류 전계가 폴리프로필렌과 같은 유전체에 인가되어 발생하는 변위전류에 의한 손실이다.

[†] 교신저자, 시니어회원 : 강릉원주대학교 전기공학과 교수 · 공박

E-mail : jgkim@gwnu.ac.kr

^{*} 정 회 원 : 충남대학교 전기공학과 박사과정수료

^{**} 정 회 원 : 호서대학교 기계공학과 교수 · 공박

^{***} 정 회 원 : 강릉원주대학교 전기공학과 교수 · 공박

접수일자 : 2010년 5월 5일

최종완료 : 2010년 6월 23일

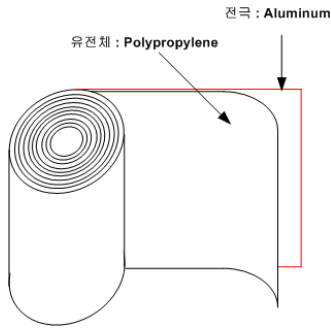


그림 1 콘덴서 기본 구조
Fig. 1 Basic structure of condenser

표 1 전극과 유전체의 매질 특성
Table 1 Medium characteristic of electrode and dielectric

매질특성	전극 (알루미늄)	유전체 (폴리프로필렌)
전기전도도 σ [S/m]	3.77×10^7	1.0×10^{-14}
비유전율 ϵ_r	1	2.2

그림 2는 본 연구에서 사용한 해석 모델의 전극과 유전체 구성도로서 그림 1에서와 같은 구조를 펼쳐 놓은 것이다. 알루미늄 전극(electrode)의 두께는 $5\mu\text{m}$ 이고, 폴리프로필렌 유전체(dielectric)의 두께는 $12\mu\text{m}$ 이며, 높이는 100mm 이다.

콘덴서 해석 모델의 열 발생을 해석하기 위해서는 기하학적인 형상을 반영한 해석이 필요한데, 그림 2에서와 같이 전극과 유전체의 두께가 높이에 비해서 매우 작기 때문에 내부 전체를 직접 해석하기 위해서는 매우 많은 시간이 소요될 뿐만 아니라 오차도 크게 발생한다.

따라서 본 연구에서는 그림 3과 같이 변위전류와 전도전류에 의해 발생하는 주울 열은 일반적으로 전극의 양 끝단 (Q_1)에서 가장 크고 전극의 중심부 (Q_2)에서 가장 작아지므로 이 두 위치에서의 주울 열을 계산하여 근사화시켜 그 발열량을 예측하는 방법을 적용하였다[5].

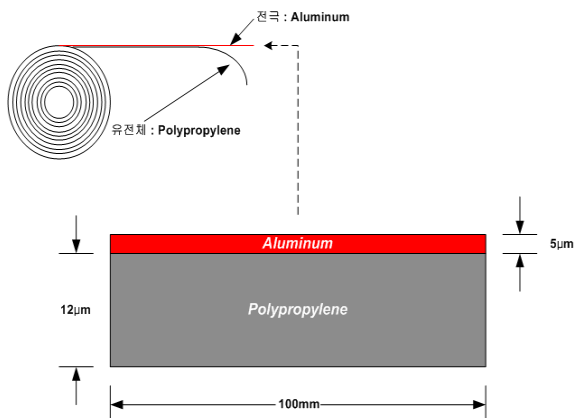
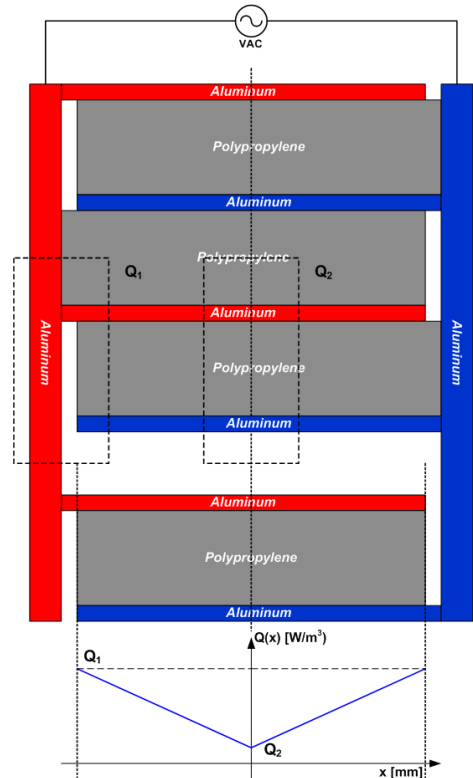
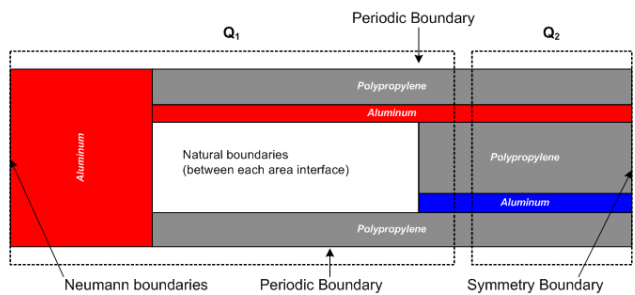


그림 2 해석모델의 전극과 유전체 구성
Fig. 2 Electrode and dielectric formation of analysis model

그림 3(a)는 그림 1과 같은 구조의 전극 및 유전체를 펼쳐 놓은 단면도로서 좌우측 전극에 교류전압이 인가되도록 되어 있다. 그림 3(a)의 하단부에 표시한 Q_1 및 Q_2 는 각각 콘덴서의 끝단 및 중심부분에서의 열 분포를 의미하고 있다. 그림 3(b)는 해석의 편의성을 위해 열이 가장 많이 분포하는 끝단과 중심부분을 해석영역으로 설정한 해석 모델이다.



(a) 개략적인 열원 분포



(b) 해석모델 구성

그림 3 열원 분포
Fig. 3 Distribution of heat source

2.2 지배방정식[3]

전력용 콘덴서에서 주울 열을 발생시키는 전류는 시간에 따른 전계의 변화에 의한 변위전류(Displacement current)와 전계에 의해 전도성매질에 전하의 이동에 의한 전도전류(Conduction current)로 구성되므로 본 해석에서는 식 (1)과 같은 지배 방정식을 적용한다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad (1)$$

여기서 ρ 는 전하밀도, t 는 시간, \mathbf{J} 는 전류밀도벡터를 나타내고 식 (1)을 다시 정리하면 식(2), (3) 으로 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\nabla \cdot \mathbf{D}) + \nabla \cdot (\sigma \mathbf{E}) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \{ \nabla \cdot \epsilon (-\nabla V) \} + \nabla \cdot \{ \sigma (-\nabla V) \} = 0 \quad (3)$$

여기서 \mathbf{D} 는 전계밀도벡터, \mathbf{E} 는 전계의 세기벡터, V 는 스칼라전위, ϵ 는 유전율, σ 는 전기전도도를 나타낸다.

그리고 전력용 콘덴서의 정상상태에 대한 열원분포특성이 중요하므로 식 (3)에 대해 정상상태해석만 하면 된다. 또한 유전체를 선형매질로 충분히 가정할 수 있으므로 다음과 같이 복소 스칼라 전위 \tilde{V} 를 도입하면 보다 빠르게 정상상태를 해석할 수 있다.

$$v(t) = |V| \cos (wt + \theta) = Re(|V| e^{j\theta} e^{j\omega t}) = Re(\tilde{V} e^{j\omega t}) \quad (4)$$

따라서 복소 형식으로 표현된 전계의 지배방정식은 식 (3)으로 부터 다음과 같이 최종적으로 얻어지게 된다.

$$-\nabla \cdot \{ (\sigma + j\omega\epsilon) \nabla \tilde{V} \} = 0 \quad (5)$$

여기서 $j = \sqrt{-1}$ 이다. 또한 복소 형식으로 표현된 시간 평균 주울 전력밀도(Time average Joule power density) Q_{avg} 는 다음과 같이 계산된다.

$$Q_{avg} = Re \left\{ \frac{1}{2} \tilde{\mathbf{E}} \cdot \tilde{\mathbf{J}}^* \right\} \quad (6)$$

여기서 $\tilde{\mathbf{E}}$ 는 복소 전계 세기 벡터, $\tilde{\mathbf{J}}^*$ 는 공액 복소 전류밀도벡터이다.

본 연구에서는 식 (5)의 지배방정식과 식(6)의 시간평균 주울 전력밀도를 구하기 위해서 상용 유한요소해석 소프트웨어인 Maxwell 프로그램을 사용하여 계산하였다.

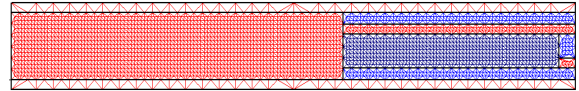
3. 유한요소법에 의한 해석결과

3.1 전극 끝단부의 주울 전력밀도(Q1)

그림 4는 전극 끝 단부(Q1)의 해석영역과 요소 분할도이다.



(a) 해석 영역

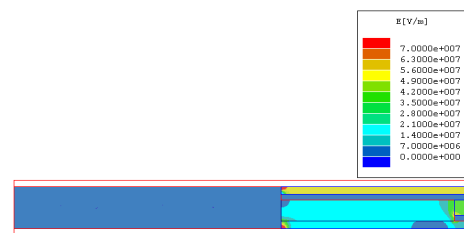


(b) 요소 분할

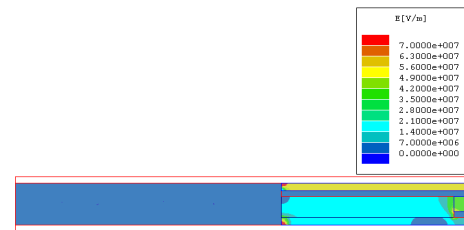
그림 4 전극 끝 단부 해석 모델

Fig. 4 Analysis model of electrode end terminal

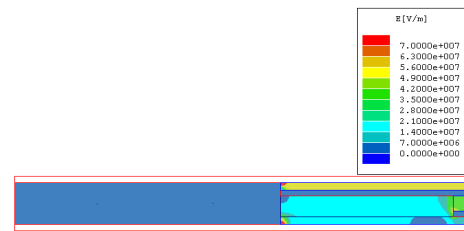
그림 5는 정격전압에서 기본과, 5고조파, 7고조파 인가 전압에 의한 전계분포 해석결과이고, 그림 6은 정격전압과 1.3 배의 정격전압 인가시 기본과, 5고조파, 7고조파에서의 전극 끝단부에서 주울 전력밀도 분포를 나타낸 것이다.



(a) 60Hz



(b) 300Hz

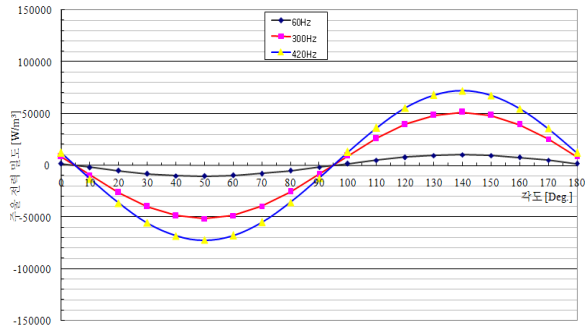


(c) 420Hz

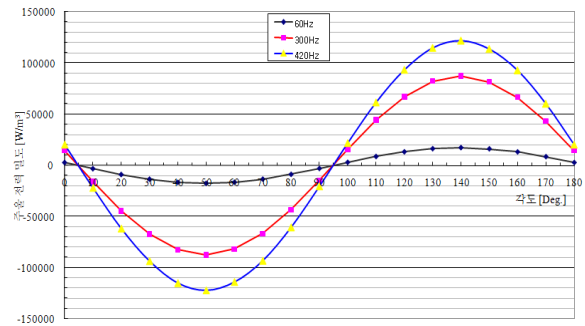
그림 5 정격전압, 주파수 변동에 따른 전계분포(Q1)

Fig. 5 Electric field distribution by varying of rated voltage, frequency(Q1)

그림 6(a)는 전극 끝단부에 대해 정격전압 인가시 해석모델의 주울 전력밀도이고 그림 6(b)는 정격전압의 1.3배 인가시 해석모델의 주울 전력밀도를 나타낸 그래프이다. 이를 시간 평균값으로 환산해서 요약하면 표 2와 그림 7과 같다. 이 해석 결과로부터 해석모델의 발열량은 인가한 전압의 주파수에 거의 비례하고 인가전압의 2승에 비례해서 분포하는 것을 정량적으로 확인할 수 있다.



(a) 정격전압 인가시



(b) 정격전압의 1.3배 인가시

그림 6 전극 끝단 부 주울 전력밀도 분포(Q_1)

Fig. 6 Distribution of Joule power density at electrode end terminal (Q_1)

표 2 시간 평균 주울 전력밀도 해석결과(Q_{avg1} [W/m²])

Table 2 Analysis result of time average joule power density

주파수 [Hz]	정격전압 인가시	정격전압x1.3배 인가시
60	6565.3	11121.4
300	32789.9	55607.0
420	45905.9	77849.8

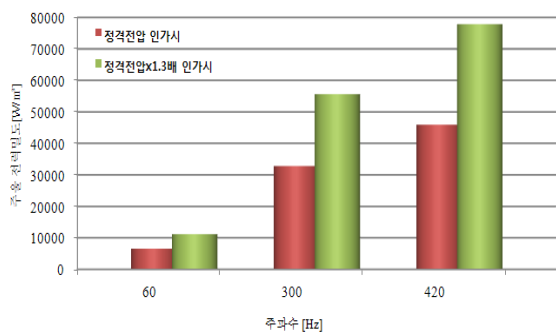


그림 7 인가 주파수에 따른 시간 평균 주울 전력밀도(Q_1)

Fig. 7 Time average joule power density by input frequency (Q_1)

3.2 전극 중심부의 주울 전력밀도(Q_2)

그림 8은 전극 중심부의 해석영역과 요소 분할도이다.

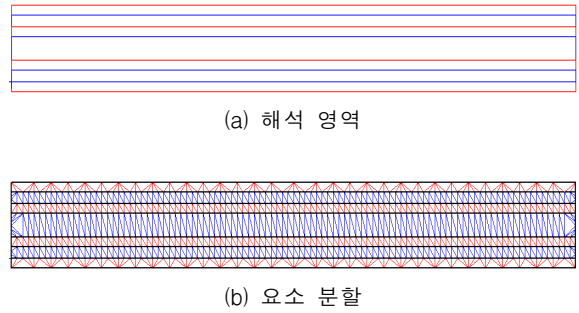
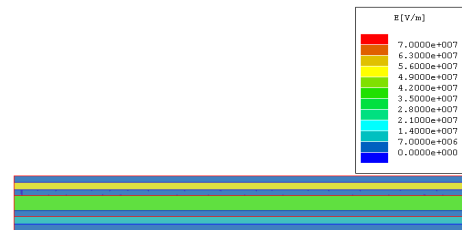


그림 8 전극 중심부 해석 모델

Fig. 8 Analysis model of electrode center part

그림 9는 전극 중심부(Q_2)에 대해 정격전압에서 기본과, 5고조파, 7고조파 인가 전압에 의한 전계분포 해석결과이고, 그림 10은 정격전압과 1.3배의 정격전압 인가시 기본과, 5고조파, 7고조파에서의 전극 끝단부에서 주울 전력밀도 분포를 나타낸 것이다.



(a) 60Hz



(b) 300Hz

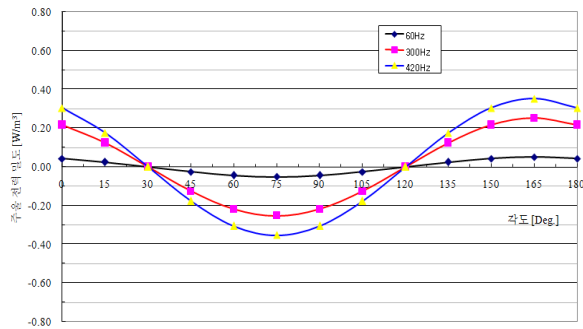


(c) 420Hz

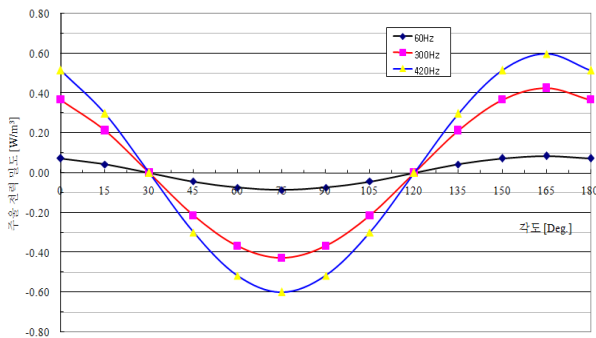
그림 9 정격전압, 주파수 변동에 따른 전계분포(Q_2)

Fig. 9 Electric field distribution by varying of rated voltage, frequency (Q_2)

그림 10(a)는 전극 중심부에 대해 정격전압 인가시 해석 모델의 주울 전력밀도이고 그림 10(b)는 정격전압의 1.3배 인가시 해석모델의 주울 전력밀도를 나타낸 그래프이다. 이를 시간 평균값으로 환산해서 요약하면 표 3과 그림 11과 같다. 이 해석결과로부터 해석모델의 발열량은 인가한 전압의 주파수에 거의 비례하고 인가전압의 2승에 비례해서 분포하는 것을 정량적으로 확인할 수 있다.



(a) 정격전압 인가시



(b) 정격전압의 1.3배 인가시

그림 10 전극 중심부 주울 전력밀도 분포(Q_2)

Fig. 10 Distribution of Joule power density at electrode center part

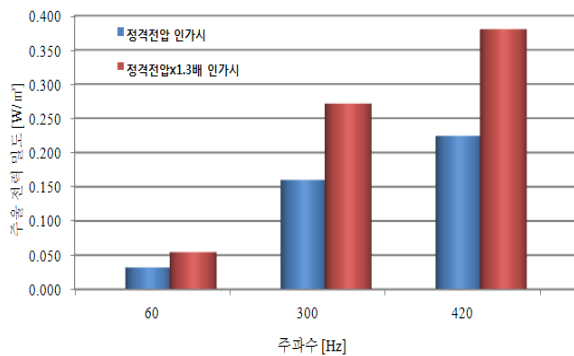


그림 11 인가 주파수에 따른 시간 평균 주울 전력밀도(Q_2)

Fig. 11 Time average joule power density by input frequency (Q_2)

표 3 시간 평균 주울 전력밀도 해석결과 ($Q_{avg2}[W/m^2]$)

Table 3 Analysis result of time average joule power density ($Q_{avg2}[W/m^2]$)

주파수 [Hz]	정격전압 인가시	정격전압x1.3배 인가시
60	0.03203	0.05432
300	0.16014	0.27158
420	0.22420	0.38021

4. 결 론

본 연구에서는 저압 콘덴서가 과전압과 고조파 전압에 의해 받는 전기적 스트레스를 분석하고자 콘덴서 중간부분과 끝단부분의 해석영역에서 발생하는 시간 평균 주울 전력 밀도를 유한요소해석 프로그램으로 해석하였다.

그 결과, 콘덴서의 중간부분에서 주울 전력밀도가 낮게 분포하고 끝단부분에서 주울 전력밀도가 높게 분포하는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 중간부분과 끝단부분에서 정격전압의 1.3배 과전압을 인가하는 경우에는 주울 전력밀도가 콘덴서 끝단부분에서는 1.32배, 콘덴서 중간부분에서는 1.7배 높게 분포하는 것을 확인하였다.

콘덴서 발열과 수명 저하의 주요한 원인으로 예상되는 고조파성분에 의한 발열을 확인하기 위해서 5고조파 전압, 7고조파 전압을 인가시, 기본파 전압을 인가한 경우와 비교한 결과, 주울 전력밀도 분포가 인가한 주파수에 비례해서 증가하는 것을 확인하였다. 즉, 5고조파 전압을 인가한 경우는 기본파 전압을 인가한 경우에 비해서 약 5배 높은 주울 전력밀도 분포를 하였고 7고조파 전압을 인가한 경우에는 기본파 전압을 인가한 경우에 비해서 약 7배 높은 주울 전력밀도 분포를 한다. 따라서 콘덴서에 과전압 또는 고조파 전압과 같은 전기적 스트레스가 인가되는 경우 발열량 증가로 콘덴서에 열적 스트레스를 증가시켜서 그 수명을 단축시키는 주요한 원인으로 작용할 수 있음을 유한요소해석을 통해서 정량적으로 분석하였다.

참 고 문 헌

- [1] Ramasamy Natarajan, "Power System Capacitors, Talyor & Francis, 2005.
- [2] 이동주, 김종겸, 이은용, 조연찬, "비선형부하에 의한 역률보상용 전력 콘덴서의 고조파 문제", 2008년 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 2008. 7
- [3] 김종겸 외 3인, "전압 및 전류 고조파에 의한 커패시터 동작 특성", 대한전기학회 논문지, Vol.58P, No. 3, pp.257~262, 2009. 9
- [4] Maxwell Electromagnetic Field Simulation Tools v.12
- [5] Se-Hee Lee et al., "Local Heat Source Approximation Technique for Predicting Temperature Rise in Power Capacitors," IEEE Transactions on Magnetics, Volume 45, Issue 3, March 2009 Page(s):1250~1253.

저 자 소 개



김 종 겹 (金宗謙)

1961년 10월 3일생. 1984년 동아대학교 전기공학과 졸업. 1996년 충남대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1996년~현재 강릉원주대학교 전기공학과 교수. 현재 당학회 평의원, B부문 총무이사

Tel : 033) 760-8785

E-mail : jgkim@gwnu.ac.kr



이 동 주 (李東周)

1973년 7월 31일생. 1996년 충남대학교 전기공학과 졸업. 1998년 충남대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1999년~2010년 5월. 이화전기 기술연구소 근무. 2010년 현재 국제통신공업(주) 기술연구소 근무 중.

Tel : 031) 595-1214

E-mail : ldjn016@show.co.kr



김 일 중 (金一中)

1958년 12월 10일생. 1980년 충남대학교 전기공학과 졸업. 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1992년~2005년 주성대학 전기과 교수. 2006년 (주)일신엔지니어링 기술연구소장. 2007년~현재 호서대학교 기계공학과 교수.

Tel : 041) 540-9633

E-mail : ilkim@hoseo.edu



박 영 진 (朴永鎭)

1959년 11월 19일생. 1982년 단국대학교 전기공학과 졸업. 1996년 단국대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1996년~현재 강릉대학교 전기정보통신공학부 교수.

Tel : 033) 760-8784

E-mail : popspark@gwnu.ac.kr