

논문 2016-53-10-16

전도 냉각 파워 커패시터의 주파수 응답 곡선 분석

(Analysis of Frequency Response Curve for
Conduction-Cooled Power Capacitors)

안 경 문*, 김 희 식**

(Gyeong Moon An[Ⓢ] and Hiesik Kim)

요 약

고주파 유도가열장치는 LC공진회로에 고주파 전원을 인가하여 금속을 가열 할 수 있다. 공진회로는 워크 코일과 전도 냉각 커패시터로 구성되며, 커패시터의 특성에 따라 열처리 설비의 성능을 좌우한다. 그러나 전도 냉각 커패시터는 국내 원천기술의 연구개발 부족으로 해외 수입 의존도가 높다. LC공진 시 커패시터 내부의 발열을 최소화하고, 무효 전력손실을 줄이며, 내 전압특성이 우수한 커패시터가 요구된다. 국산화를 위하여, 선진 제조사의 완성품 커패시터의 주파수 응답 특성 분석에 대한 선행 연구가 필요하다. 주어진 로그-로그 특성 곡선의 임의 점에서 값을 읽기 위한 보간법을 연구하여 매트랩 코딩으로 커패시터의 분석 도구로 적용하였다. 커패시터를 간단 화 된 RC 직렬 등가 회로로 가정하고, 등가 직렬 저항 ESL 값을 구하여 주파수 응답 특성 곡선을 재현하는 시뮬레이션을 시도하였다. 실제 무효전력의 피크 치에 대한 특성과 시뮬레이션 특성을 비교할 때 재현율이 83% 이상 결과 값으로 나타나는 것을 확인할 수 있었고, 이 알고리즘은 간단 화 된 모델의 커패시터 특성곡선을 분석하여 예측 할 때 적용이 가능하다.

Abstract

High-frequency induction heating equipment can heat the metal by applying a High-Frequency power to the resonant circuit. The resonance circuit is composed of the work coil and the conduction-cooled power capacitor, it influences the performance of the heat treatment equipment according to the characteristics of the capacitor. However, dependence on conduction-cooled power capacitor's import is high due to lack of core technology research and development. Minimizing the generation of internal heat transmitted inside during LC resonance, reduce the reactive power loss, there is a need for a capacitor within the voltage characteristic outstanding. To implement localization it is vital that prior study of the analysis on the frequency response characteristic for the finished capacitor advanced manufacturer be implemented. Studying the interpolation method to read the value at any point of the characteristic curve for a given log-log scale was applied to the analysis tool of the capacitor by my proposed algorithm. The simulation for reproducing frequency response curves was attempted by assuming a capacitor in a simplified series equivalent RC circuit to obtain the equivalent series resistance value. It was confirmed that the reproduction rate was the result value above 83% as compared to the simulation of the properties and characteristics on the actual reactive power for Peak value, and that the algorithm can be applicable when analyzing and predicting the characteristic curves of a simplified model capacitor.

Keywords : Conduction-Cooled Power Capacitor, Frequency Response, ESL, HF Induction Heating, Log interpolation

* 학생회원, ** 정회원, 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학과 (Department of Electrical and Computer Engineering, University of Seoul)

Ⓢ Corresponding Author (E-mail : drhskim@uos.ac.kr)

※ 본 연구는 중소기업청에서 지원하는 중소기업기술개발지원사업(No.S2164405) “열처리 산업용 대용량 (150kvar) 고주파 전도냉각 커패시터 개발”으로 지원받아 수행한 연구임.

Received ; August 1, 2016

Revised ; August 28, 2016

Accepted ; September 28, 2016

I. 서 론

고주파 유도가열에 의한 열처리는 기계 산업분야에서 1차 가공이 끝난 후 내구성을 강화하는 표면 경화 공정이다. 이 공정은 가열하고자 하는 피 가열 물을 워크 코일 속에 넣고 LC공진회로에 고주파 전원을 인가하면 워크 코일 주변에 교류전류에 의한 교번자속이 발생한다. 이 자계 속에 놓인 도체에는 유도전류가 발생

하게 되며 이 전류를 와전류라고 한다. 도체에 발생하는 자력선의 변화를 방해하는 방향으로 전류가 흐르게 된다. 이때 인가되는 전압에 의해 흐르는 코일전류와 유도전류의 방향이 서로 반대가 되어 피 가열물인 철과 같은 자성체의 경우는 주울 열에 의한 저항손실과 와전류에 의한 히스테리시스 손실이 발생한다.^[1] 피 가열물의 도체 직경이 클수록, 주파수가 높을수록 내부 인덕턴스가 증가하여 도체의 표면에만 전류가 집중되는 표피효과가 나타난다. 이러한 결과로 다음의 그림 1과 같이 표면에만 가열이 집중되는 현상이 나타나게 된다.

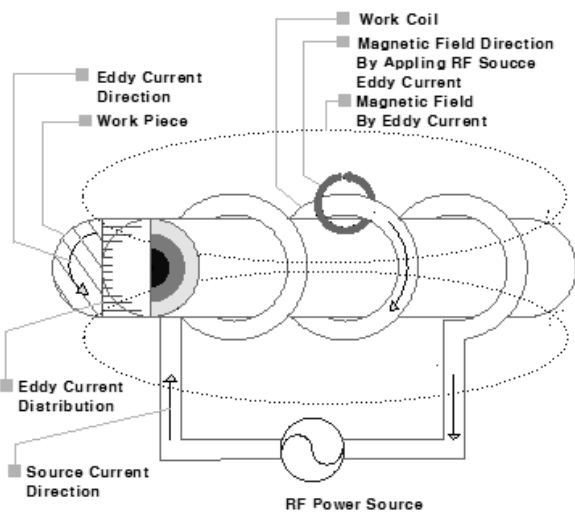


그림 1. 산업용 고주파 유도가열장치의 원리
Fig. 1. The Principle of Industrial High Frequency Induction Heating Device.

고주파 유도가열에 의한 표면 경화 열처리 는 단시간 국부가열로 표면 경화의 깊이를 선택 할 수 있고, 직접 가열에 의한 열효율도 뛰어나다. 또한 베어링, 기어, 크랭크샤프트 같은 구조가 복잡한 소형부품의 열처리가 가능하고 피 가열 체의 응력변화를 줄일 수 있다. 탈탄이나 산화로 인한 화학적인 변화가 없을 뿐만 아니라 자동 공정라인 구축이 가능하며 이외에도 여러 가지 장점이 있다.^[2] 공진회로는 워크 코일과 전도 냉각 커패시터로 구성되며, 커패시터의 특성에 따라 열처리 설비의 성능을 좌우한다. 그림 2는 고효율의 100KW 급 고주파 유도 가열장치의 워크 코일 속에 있는 스프라켓의 담금질 공정을 보여주고 있다. 산업용 기계부품 가공 공정에서 열처리 설비는 가열과 냉각을 반복하여 금속 재질의 특성 개선을 위하여 필수적인 산업 설비이다. 전도 냉각 파워 커패시터의 응용분야는 산업용 유도가

열장치 뿐만 아니라 철도산업에서 열차 무선 급전장치의 공진회로 등의 다양한 전력전자 산업분야에 널리 적용이 될 수 있다.

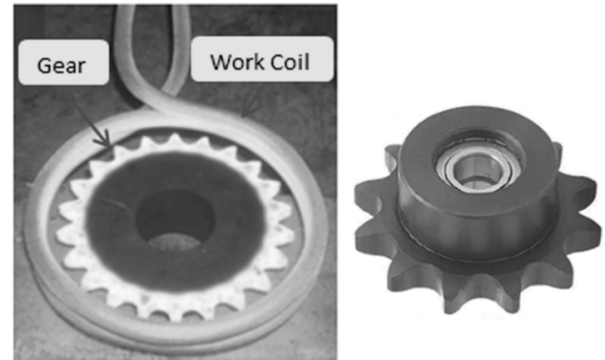


그림 2. 산업용 고주파 유도가열장치로 표면 경화 열처리 중인 가공 부품^[3]
Fig. 2. Surface Hardening Heat Treatment and Machining Parts in Industrial High Frequency Induction Heater.

그러나 전도 냉각 커패시터는 국내 원천기술의 연구 개발 부족으로 해외 수입 의존도가 높은 실정이다.. 공진 시 커패시터 내부의 발열을 최소화하고, 무효 전력 손실을 줄이며, 설비에서 요구하는 허용 전압범위에서 견딜 수 있는 내 전압특성이 우수한 커패시터의 개발이 필요하다. 따라서 커패시터의 국산화를 위하여 선진 제조사의 완성품 커패시터의 주파수 응답 곡선을 분석하고 재현하는 단계로 주어진 로그-로그 스케일 특성 곡선의 단위 눈금사이에서 임의의 점의 값을 정확하게 읽는 것을 쉬운 일이 아니다. 로그 특성그래프의 단위 눈금 값 사이의 임의의 점에서 값을 읽을 수 있는 보간 알고리즘을 연구하여 맷랩 코딩으로 커패시터의 분석도구로 적용해본다. 커패시터를 간단 화 된 RC 직렬 등가회로로 가정하고, 등가 직렬 저항 값을 구하여 주파수 응답 특성 곡선을 재현하는 시뮬레이션까지 진행한다. 실제 특성 그래프의 무효전력 피크 치 곡선과 시뮬레이션 특성 그래프와 비교하여 재현율이 70% 이상 근사하다면 실제 설계에서 용량 값에 따른 커패시터의 전압, 전류, 무효전력 특성을 예측할 수 있을 것이다.

II. 커패시터의 특성 분석

2.1 LC 공진회로의 배경 이론

산업용 고주파 유도가열장치의 이용되는 LC공진회로는 다음의 그림 3와 같이 등가회로로 나타낼 수 있다.

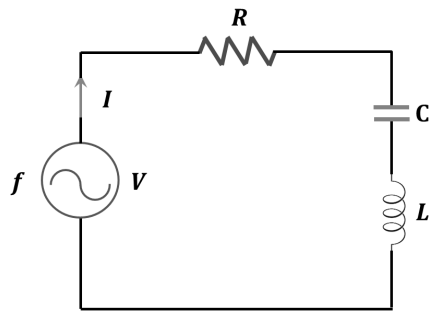


그림 3. RLC 직렬회로
Fig. 3. Circuit of RLC Series.

그림 3의 회로 임피던스 크기는 저항 성분과 리액턴스 성분의 벡터 합으로 식 (1)같이 나타낼 수 있다.

$$|Z| = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (1)$$

이때 위상각은 식 (2)와 같고 공진 시 $X_C = X_L$ 일 때 임피던스의 허수부는 0이 되어 실수부는 R만의 회로이고, 위상차 ϕ 는 0이 된다.

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{X_L - X_C}{R}\right) \quad (2)$$

이때 전류는 최대가 되는 공진 주파수는 식 (3)과 같다.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} [Hz] \quad (3)$$

LC의 공진주파수에 따라 피 가열 체의 표면 경화 가열 깊이를 조절할 수 있다.^[5] 식 (3)의 정전 용량은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{d} [\mu F] \quad (4)$$

C: 정전용량(Capacitance: C)의 단위 [Farad: F]

ϵ_0 : 진공 유전율 0.085×10^{-12} [Farad/ Cm]

ϵ_r : 비유전율은 절연물질에 따라 결정

S: 전극 면적 [Cm²]

d: 마주보는 전극간의 간격 [Cm]

정전 용량을 크게 하기 위한 방법으로 전극의 면적을 넓게 하고 전극간의 간격을 좁게 하거나, 전극 사이의 비유전율이 큰 유전체를 사용하는 것이다. 최대 정격 전압은 유전체의 저항률, 유전체 필름의 두께, 유전체의 내압에 따라 결정되고, 최대 정격 전류는 금속증착 전극의 두께, 전극 면적의 크기에 따라 변화한다.

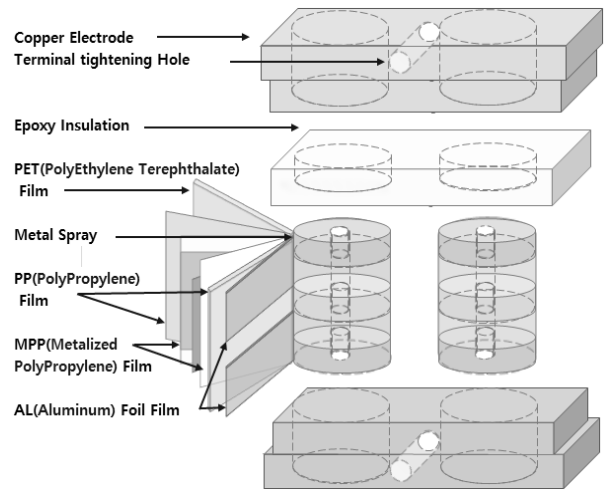


그림 4. 전도 냉각 파워 커패시터 어셈블리^[7]
Fig. 4. Assembly with a Conduction-Cooled Power Capacitors.

그림 4는 전도 냉각 파워 커패시터의 구조를 나타내고 있다.

2.2 샘플 파워 커패시터의 주파수 응답 곡선

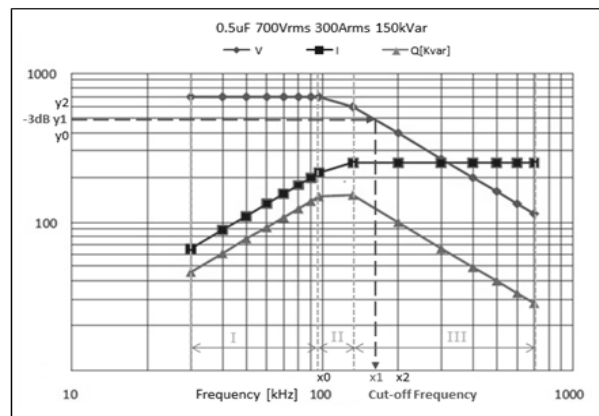


그림 5. B사의 샘플 파워 커패시터의 주파수 응답 곡선, -3dB 차단주파수 표시

Fig. 5. The Frequency Response Curve of a Sample of the Power Capacitor B Manufacturer, Marked -3dB Cut-off Frequency.

그림 5는 커패시터의 성능을 결정하는 곡선으로 현재 국내 B사에서 생산하는 샘플 커패시터의 주파수 응답 곡선이다. 중요한 파라미터는 실효치 전압 V_{rms} [V], 전류 I_{rms} [A], 무효전력 $Q[kVar]$ 이다. 주파수 응답곡선은 3개의 영역으로 구분할 수 있다. I 영역은 전압이 일정한 구간으로 이온화에 의한 전압제한 영역이고 II 영역은 전력손실과 유전정접에 의한 전압과 전류 제한 영역이다. III 영역은 전류가 일정한 구간으로 전극리드에

의한 전류제한 영역이다.^[8] 파워 커패시터 양단의 실효치 전압 V_{rms} 을 나타내는 곡선은 주파수가 높아지는 고역부분으로 갈수록 점차적으로 감소하는 저역통과 필터의 특성과 유사하다는 것에 연구의 착안을 얻을 수 있다.^[9] 그림 5에서 $-3dB$ 의 전압이 되는 점의 차단 주파수를 알고 있다면 역으로 등가 직렬 저항을 구할 수 있기 때문이다.

2.3 파워 커패시터의 등가회로 분석

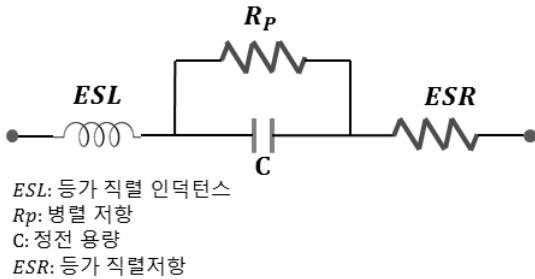


그림 6. 파워 커패시터의 등가회로
Fig. 6. Capacitor equivalent circuit.

일반적인 커패시터의 등가회로는 그림 6과 같이 RLC 직·병렬회로로 나타낼 수 있다. 그림 6에서 등가 직렬 인덕턴스 ESL은 3[nH]로 너무 작아서 무시할 수 있고, 절연저항 또는 병렬저항은 낮은 주파수에서는 10[MΩ] 정도로 너무 커서 영향이 거의 없다고 가정한다.

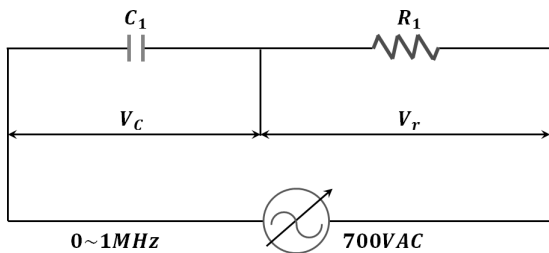


그림 7. RC 직렬회로
Fig. 7. RC series circuit.

따라서 그림 6을 간략화 한 RC 등가회로로 그림 7과 같이 나타낼 수 있다. B사의 샘플 파워 커패시터 등가 회로는 그림 7과 같이 나타낼 수 있다. 커패시터의 간략화 등가회로는 RC 저역필터와 같은 회로라고 가정할 수 있다. 이때 RC 저역필터의 차단주파수 f 는 식 (5)와 같다.

$$f = \frac{1}{2\pi RC} [Hz] \tag{5}$$

파워 커패시터 양단에 인가되는 $-3dB$ 전압은 식

(6)과 같다.

$$-3dB \text{ 전압} = \frac{V_s}{\sqrt{2}} [V] \tag{6}$$

인가되는 시스템전압 V_s 를 식 (6)에 대입하면 $-3dB$ 차단 전압을 구할 수 있다. y 축의 $-3dB$ 의 전압과 교차하는 x 축이 차단 주파수가 된다. x 축과 y 축이 균등 간격 눈금이 아니라 상용대수 눈금의 그래프임을 고려할 때, 교점 좌표의 값을 읽는 것은 쉽지 않기 때문에 새로운 방법을 연구하여 적용하기로 한다.

2.4 선형 보간법

그림 8과 같이 두 점 x_1 과 x_2 에서의 값이 각각 $f(x_1), f(x_2)$ 일 때, x_1, x_2 사이의 임의의 점 x 에서의 값 $f(x)$ 는 계산할 수 있다.



그림 8. 선형 보간법의 일반화^[10]
Fig. 8. Generalization of linear Interpolation.

x_1 과 x_2 사이에 있는 점 x 의 값을 추정하기 위해 식 (7)과 같이 선형 보간법의 적용이 가능하다.

$$f(x) = \frac{d_2}{d_1 + d_2} f(x_1) + \frac{d_1}{d_1 + d_2} f(x_2) \tag{7}$$

단, d_1 은 x 와 x_1 사이의 거리이며, d_2 는 x 와 x_2 사이의 거리이다. 만일 $d_1 + d_2 = 1$ 이 되도록 정규화하면 식 (7)은 식 (8)과 같이 단순화하여 나타낼 수 있다.

$$f(x) = d_2 f(x_1) + d_1 f(x_2) \tag{8}$$

2.5 선형 보간법 일반화의 상용대수의 적용

x_0 와 x_2 사이에 있는 점 x_1 의 값을 추정하기 위해 선형 보간법에 상용대수 스케일을 적용한다.

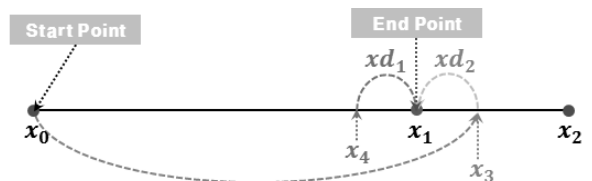


그림 9. 선형 보간법의 일반화에 상용대수 적용
Fig. 9. Logarithmic Scale Applied to The Generalization of Linear Interpolation.

그림 9에서 $x_0 \sim x_2$ 의 사이에 임의의 점 x_1 이 있다고 가정하자. 상용대수 값에 비례해서 증가하므로 식 (9)에 대입하여 $x_0 \sim x_2$ 까지 i 값을 x_0 의 값 0에서부터 10까지 0.1씩 증분을 시작한다. x_3 값이 x_1 보다 같거나 크다면 증분을 정지한다. x_1 을 기준으로 계산한 값이 x_{d1} 과 x_{d2} 사이의 차이를 계산하여 오차가 작은 쪽을 선택하도록 한다. 실제 증분 값을 $i=10^{-7}$ 정도로 아주 작게 변화하면 정밀한 근사 값의 계산이 가능하다.

$$Cut-off\ Frequency = \log_{10}(i) \times (x_2 - x_0) \quad (9)$$

2.6 주파수 응답 곡선의 보간법에 의한 분석

제안하고자 하는 알고리즘은 첫째는 계산된 상용대수 표 작성하여 표를 찾는 방법이다. 첫 번째 1단계는 그림 5에서 x_1 의 구간의 y 축과 교차점의 양쪽의 시작과 끝의 길이를 측정된 값을 상용대수와 곱한다. $x_0 \sim x_2$ 의 길이를 밀리미터의 자를 이용하여 직접 측정한다. 이때 확대된 그래프를 이용하면 보다 정확한 근사 값의 측정이 가능하다. 경험상으로 그래프가 확대율은 12~64배가 적당하다. 노트북 모니터 화면의 크기가 15.4인치 일 경우, 특성 그래프의 $x_2 - x_0$ 길이를 최대 크기로 부분 확대율을 조정하면 화면상에 꼭 채울 수 있는 비율은 12배로 최대가 될 것이다.

표 1. 상용대수 룩-업 표
Table1. Log Look-Up Table.

예시) $x_2 - x_0 = 191mm$
증분

i	$\log(i)$	$\log(i) \times (x_2 - x_0)$
1.0	0	0
1.1	0.041392685	7.906002865
1.2	0.079181246	15.123618
1.3	0.113943352	21.76318029
.		
.		
4.6	0.662757832	126.5867459
4.7	0.672097858	128.3706909
$C \rightarrow$ 4.8	0.681241237	130.1170763 $\leftarrow B$
4.9	0.69019608	131.8274513
5.0	0.698970004	133.5032708
.		
.		
9.6	0.982271233	187.6138055
9.7	0.986771734	188.4734012
9.8	0.991226076	189.3241805
9.9	0.995635195	190.1663222
10.0	1	191 $\leftarrow A$

식 (9)에서 값 i 를 1~10까지 0.1씩 증분하여 표 1과 같은 상용대수 룩-업 표를 만든다. 첫 번째 2단계는 $-3dB$ 값과 교차하는 x_1 의 값을 $x_1 - x_0$ 의 길이를 밀리미터의 자로 직접 측정하고 식 (9)에서 계산한 상용대수 표에서 일치하는 근사 값을 찾아서 그때 i 값이 실제의 상용대수 값이 된다. 예를 들어 그림 5에서 $x_2 - x_0$ 의 측정된 길이가 191mm이면 값을 입력 후 증분 값을 1에서 10까지 변화시켜 상용대수 값으로 변환하면 표 1과 같다. 마지막 변환 값이 A 와 같이 191가 된다. $-3dB$ 값과 교차하는 $x_1 - x_0$ 의 측정값을 길이가 130mm이면 변환된 근사 값은 B 와 같이 130.1170763이 되고 이때 일치하는 증분 값 C 는 4.8이 된다. 커패시터의 주파수 응답 곡선에서 $x_0 = 100kHz$ 이다.

$$cut-off\ Frequency = x_0 + 48kHz = 148kHz$$

둘째는 이것을 공학도구인 메틀랩으로 코딩하여 계산된 상용대수 표에서 근사 값이 작은 쪽으로 자동으로 결정하도록 하는 방법이다. $x_2 - x_0$, $x_1 - x_0$ 의 값을 직접 밀리미터의 자로 측정 후 측정된 길이를 입력하면 작성된 표 1의 상용대수 룩-업 표에 차단주파수 계산이 가능하다.

III. 시뮬레이션

시뮬레이션을 위한 계산식은 다음과 같다. 일반적으로 등가 직렬 저항 ESR 은 전극의 저항률과 유전체의 유전 손실의 합이 나타나는 기생 직렬 저항 성분으로 식 (10)와 같다.

$$ESR = \frac{\tan \delta}{wC} [m\Omega] \quad (10)$$

유전체에 교류를 인가하면 생기는 전력손실을 유전 손실이라고 한다. 이 전력손실의 비율을 유전정점($\tan \delta$)이라하고 손실계수 DF 또는 Q 의 역수로 식 (11)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\tan \delta = DF = \frac{1}{Q} \quad (11)$$

커패시터의 주파수 응답 곡선을 플로팅하기 위한 계산식은 다음과 같다. 식 (5)를 이용하여 R 에 관한 식으로 풀면 다음 식(12)와 같다.

$$R = \frac{1}{2\pi f C} [\Omega] \tag{12}$$

그리고 커패시터의 등가 직렬 저항 *ESR* 값은 2.15183362[Ω] 이 된다. 용량리액턴스 X_C 과 파워 커패시터의 전압 V_C 는 다음 식 (13)과 식 (14)와 같다.

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} [V] \tag{13}$$

$$V_C = \frac{X_C}{Z} \cdot V_S = \frac{X_C \cdot V_S}{\sqrt{R^2 + X_C^2}} [V] \tag{14}$$

파워 커패시터에서 소비하는 무효전력 $Q[kVar]$ 은 식 (15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Q = \frac{V_C^2}{X_C} = 2\pi f C V_C^2 [kVar] \tag{15}$$

이때 흐르는 전류 $I[A]$ 도 식 (16)과 같이 나타 낼 수 있다.

$$I = \frac{V_C}{Z} = \frac{V_C}{\sqrt{R^2 + X_C^2}} [A] \tag{16}$$

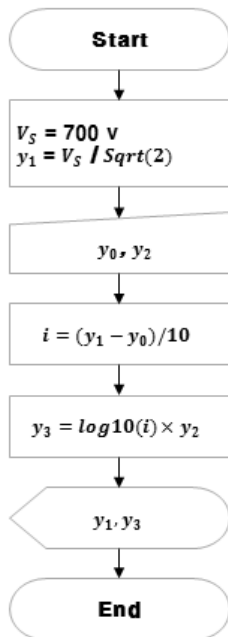


그림 10. 상용대수 스케일 변환 플로 차트^[11]
Fig. 10. Flow Chart of Log Scale Conversion.

그림 9에서 선형 보간법의 일반화에 상용대수를 적용한 알고리즘에 해를 구하는 수치해석을 적용한 플로 차트는 그림 10과 같다.

그림 10은 상용대수 스케일 변환 플로 차트이고,

그림 5에서 식 (6)를 이용하여 $-3dB$ 점의 전압 y_1 을 계산하면 494.9747468 V가 된다. 그래프의 수직 단위 눈금 간격이 미소하기 때문에 미소 길이의 정밀 측정은 사실상 불가능하다. 그러므로 12배~64배 정도로 확대해서 측정하면 정밀 실측이 가능하다. 확대율을 조정하면 32배가 최적이다. $y_2 - y_0$ 의 구간의 길이를 밀리미터의 차로 측정하면 82mm 이다.

즉, $y_2 - y_0 = 82mm$ 인 값을 입력하면 $-3dB$ 의 전압 값 494.9747468 V를 $y_1 - y_0$ 구간의 길이를 밀리미터의 값 80.1639mm으로 환산하여 계산해준다. 이 길이를 직접 그래프에 마킹하면 y_1 과 x_1 의 교차점이 차단 주파수이다. 2.5절에서 보여준 주파수 응답 곡선의 보간 분석법에 의한 식 (9)을 적용하면 차단 주파수는 148kHz 된다.

그림 11은 상용대수 스케일 역변환 플로 차트가 된다. 쉽게 설명하면 그림 11을 역으로 풀어서 그림 10의 플로 차트를 구할 수 있다. 그림 12는 앞에서 설명한 파워 커패시터의 주파수 응답 곡선 시뮬레이션의 플로 차트

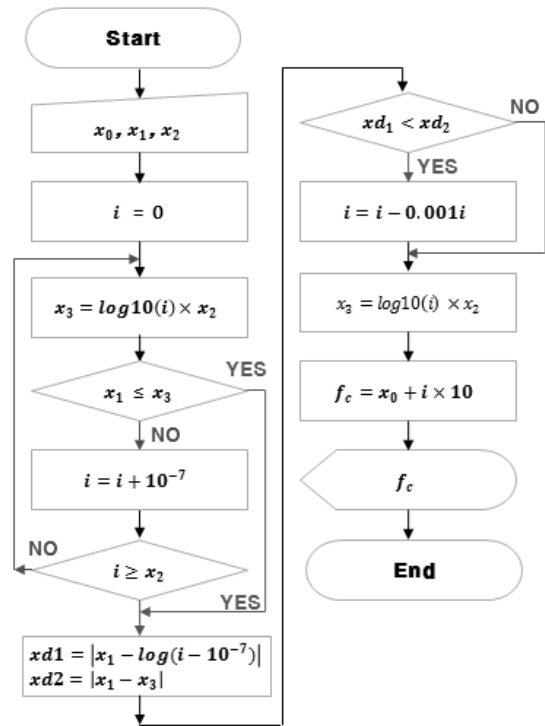


그림 11. 상용대수 스케일 역변환 플로 차트
Fig. 11. Flow Chart of Log Scale Inverse Conversion.

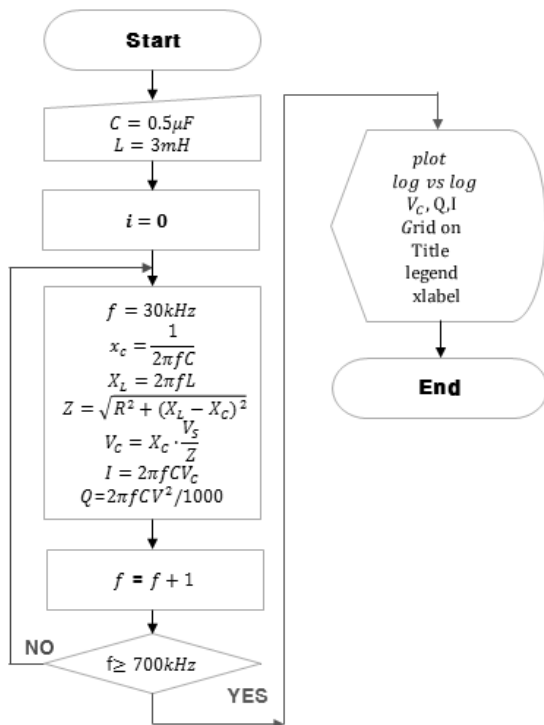


그림 12. 파워 커패시터의 주파수 응답 곡선 시뮬레이션의 플로 차트

Fig. 12. Flow Chart of Frequency Response Simulation Graph of The Capacitor.

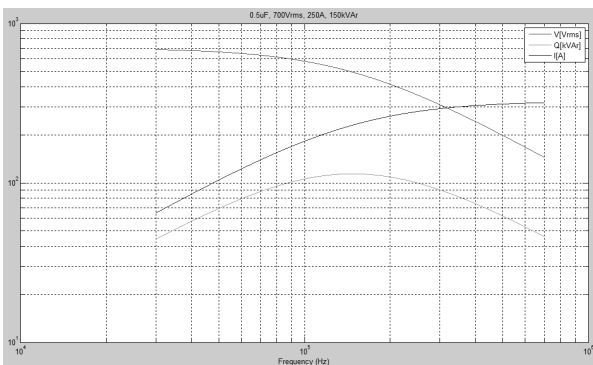


그림 13. 파워 커패시터의 주파수 응답 시뮬레이션

Fig. 13. Frequency Response Simulation Graph of The Capacitor.

그림 13은 주파수 응답 특성 그래프를 플로팅하기 위하여 공학도구인 매트랩으로 코딩하여 주파수를 0~1MHz까지 변화시켜 V, I, Q의 특성 그래프를 시뮬레이션 한 결과이다. 처음에 시도한 방법은 비주얼 베이직 코딩으로 오백만개 이상의 방대한 양의 데이터 연산을 수행하고 셀에 저장 후 플로팅 하는 시간이 PC의 성능에 따라 처리속도는 달라지나 10분 이상이 소요되었다. 공학도구인 매트랩으로 코딩하여 2분 이내로 연산처리 시간을 단축하도록 개선하였다. 기준 무효전력 피크 치

는 150 kVAR 이나, 실제 커패시터 특성 그래프의 무효 전력 139 kVAR, 이고 시뮬레이션 특성 그래프의 무효 전력 116 kVAR 와 비교할 때 재현율이 83% 이상으로 근접한 결과 값으로 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

IV. 결 론

본 논문에서는 커패시터의 국산화를 위하여 선진 제조사의 완성품 커패시터의 주파수 응답 곡선을 분석하고 재현하는 것을 시도하였다. 주어진 로그-로그 스케일 특성 곡선의 단위 눈금사이에서 임의의 점 값을 정확하게 읽는 것을 쉬운 일이 아니다. 로그 특성그래프의 단위 눈금 값 사이의 임의의 점에서 값을 읽을 수 있는 보간 알고리즘을 연구하여 매트랩 코딩으로 커패시터의 분석도구로 적용했다. 커패시터를 간단 화 된 RC 직렬 등가회로로 가정하고, 등가 직렬 저항 값을 구하여 주파수 응답 특성 곡선을 재현하는 시뮬레이션까지 진행하였다. 그 결과로 기준 무효전력 피크 치는 150 kVAR 이나, 실제 커패시터 특성 그래프의 무효전력 139 kVAR 이고 시뮬레이션 특성 그래프의 무효전력 116 kVAR 와 비교할 때 재현율이 83% 이상 근접한 결과 값으로 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 실제 설계에서 용량 값에 따른 커패시터의 전압, 전류, 무효전력 특성을 예측할 수 있을 것이다. 이 알고리즘은 간단 화 된 모델의 커패시터를 분석 할 때 적용이 가능하다. 향후 연구과제로 시뮬레이션 특성 곡선의 오차를 최소화하는 방법으로 복잡한 모델의 커패시터에 대한 보완 된 연구가 필요하다.

REFERENCES

- [1] The principle of induction heating utility, dawonsys.com, <http://dawonsys.com>
- [2] MetalKorea, "Technical equipment/quenching, Tem-pering (Quenching) High Frequency Induction HeatingEquipment", http://www.metalnet.co.kr/Technical/Induction/HF107_Quenching/HF_Quenchi ng.html
- [3] High efficiency 100KW Induction Heating Equip-ment Machine For Gear Quenching, Guang Yuan Technology (HK) Electronics Co.,Ltd., <http://www.induction-heatingequipment.com>
- [4] Tangent delta, <https://www.garmanage.com/>
- [5] Woo-Seok Shin, and Hee-Chang Park, "Inverter for Induction Heating using Simultaneous

Dual-Frequency Method”, Journal of The Institute of THE Korean Institute of Power Electronics, Vol.16, No.6, 16-6-3 pp. 554-560, December 2011.

[6] Seyed Amidedin Mousavi & S.Hajilu, H.Kaboudvand, S.Sabaifard, N.Amini, E.Hasani, “Calculation The Dissipation Factor of Power Transformersv Insulation System Using Genetic Algorithm”, 2011. International Conference on Computer Applications and Industrial Electronics(ICCAIE 2011), pp. 580-584, 2011.

[7] Seo-Yeon Won, Kyeong-Jin Lee, and Hie-Sik Kim, “Analysis of Parameter Characteristic of Parallel Electrodes Conduction-cooled Film Capacitor for HF-LC Resonance”, Journal of The Institute of Electronics and Information Engineers, Vol.53, No.6, pp. 974-985, June 2016.

[8] ICEL, General technical information, <http://www.ichel.it/general-technical-info/>, pp. 1-23

[9] GyeongMoon An, Hiesik Kim, “Reverse Engineering of the 150 kVAR Class Conduction Cooled Power Capacitors for HF Induction Heating Equipment”, IEIE ICS’ 2016 Information & Control Symposium, pp. 145-146, Dankook University, Korea, April 2016.

[10] linear interpolation, <https://ko.wikipedia.org>

[11] GyeongMoon An, Hiesik Kim, Kyeong Jin Lee, “Simulations for Simple Model of the Water-Cooled Power Capacitor of Induction heater for Industrial”, The Korean Society of Mechanical Engineers, 2016 IT Convergence depart., Conference, pp. 97-98, The University of Seoul, Korea, May 2016.

저 자 소 개



안 경 문(학생회원)
 1986년 부경대학교 전자공학과(공학사)
 2014년 서울시립대학교 전자전기공학과(석사)
 2015년~현재 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학과(박사과정)
 1994년~2001년 현대중공업(주) 중전기사업본부
 2009년~2011년 한국폴리텍1대학 전기과 강사
 2012년~2015년 현대건설기술교육원 전문위원 외
 <주관심분야: 시퀀스 제어회로의 최적배선공법, 태양광발전시스템의 냉각장치>



김 희 식(정회원)
 1977년 서울대학교 기계공학과(공학사)
 1979년 한국과학기술원 생산공학과(공학석사)
 1987년 Germany Stuttgart University Production Engineering (공학박사)
 1979년~1982년 과학기술부 원자력국 감사관실 사무관
 1987년~1989년 한국과학기술원 CAD/CAM 연구실 선임연구원
 1989년~현재 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부 교수
 <주관심분야: Optical Measurement of Geometries, Application of Sensor for Automation and Image Processing>