

# 단극발전기의 내부 인자를 적용한 평활필터 설계

金仁秀<sup>†</sup>, 成世鎭\*

## Smoothing Filter Design Applying a Parameter of a Homo-polar Generator

In-Soo Kim and Se-Jin Seong

### 요 약

본 논문에서는 필터 설계시 고려해야 될 주요 항목 중 하나인 성능인자 권장값을 만족시키기 위해 단극 발전기의 내부인자 값을 필터 설계에 반영하는 새로운 평활필터 설계방법을 제안한다. 이 방법은 감쇄용 저항을 배제시킴으로서 평활필터의 효율증대 및 소형화를 기한다. 그리고 성능인자와 함께 공진주파수도 함께 고려함으로써 부성저항 특성을 갖는 고승압 변환기 등을 적용한 시스템의 안정성을 증대시킨다.

### ABSTRACT

For satisfying a recommended value of the quality factor which is one of the important elements in a filter design, a new design method of smoothing filter using an internal parameter of a homopolar generator is proposed. The method increases the efficiency and minimizes the size of the smoothing filter by removing the damping resistor. By considering the resonant frequency as well as the quality factor, the new method can improve the stability of the system which has high boosting converters with negative resistance characteristics.

**Key Words** : Smoothing filter, Homopolar generator, Power source, Negative resistance, Quality factor, Resonance frequency, Oscillation

### 1. 서 론

일반적으로 전원 출력단의 평활필터 설계는 맥동전압을 제거하기 위한 최적의 인덕턴스 값 및 커패시턴스 값을 결정하는 것이다. 그리고 감쇄(damping)용 저항을 달아 필터의 성능인자(quality factor, 이하 Q) 값을 낮춰 부하단과의 안정성 문제에 여유를 가지게 한다. 이러한 감쇄저항은 지상전원의 경우 적용에 상대적으로 제약을 덜 받지만, 항공용 탑재전원의 경우 공간 및 무게 등의 제한으로 감쇄저항을 적용하는데 한계가 있게 된다. 그리고 감쇄저항은 효율을 저하시키

고, 부피를 증가시킬 뿐만 아니라 냉각소요를 초래해 시스템 설계에 부담을 주게 된다.

필터설계에 있어 Q값은 중요한 의미를 갖는다. 필터의 Q값이 너무 크게 되면, 필터의 공진주파수에서 이득(gain)의 증가를 유발하며, 부하단의 스위칭 전원들과 함께 안정성 문제를 야기할 수도 있게 된다. 따라서 필터설계 시, 필터의 감쇄특성에 영향을 미치지 않는 범위에서 필터의 Q값을 낮추어 적용해야 한다<sup>[1]</sup>.

최근 부성저항(negative resistance) 특성을 갖는 DC/DC 컨버터의 활용이 일반화되면서 시스템의 안정성 문제가 대두되고 있다. 특히 고승압 컨버터의 경우 안정성 문제는 더욱 커지게 된다<sup>[2,3]</sup>.

본 논문에서는 단극 발전기의 내부인자 값을 필터설계에 적용함으로써 별도로 감쇄용 저항을 적용하지 않고도 필터회로의 성능인자, Q값을 낮추는 평활필터 설계방법을 제안한다. 그리고 평활필터용 인덕터 선정시

<sup>†</sup>교신저자 : 정회원, 국방과학연구소 책임연구원

E-mail : kislamp@chol.com

\*정회원, 충남대 정보통신공학부 교수

접수일자 : 2007. 7. 16 1차 심사 : 2007. 8. 8

2차 심사 : 2007. 9. 5 심사완료 : 2007. 9. 6

일반적인 부하단의 높은 공진주파수와 평활필터의 공진주파수를 낮게 하여, 서로 겹치지 않게 함으로서 시스템의 안정성을 향상시키는 방법을 함께 제안한다.

## 2. 평활필터 및 시스템 안정성

### 2.1 평활필터

필터는 비조화(mismatching) 장치로서의 특성을 가져야 한다. 전력전달 측면에서, 최대 전력전달 기준은 소스와 부하의 저항이 같거나, 또는 임피던스가 공액 복소수이어야 한다. 반면에, 필터측면에서는 고주파의 전력전달이 최소가 되어져야 하므로, 소스와 부하의 임피던스가 최대로 비조화 되어져야 한다<sup>[1]</sup>.

필터설계에 있어 성능인자 Q값의 중요성은 서론에서 언급하였으며, 필터의 Q값이 1보다 크게 되면, 필터는 공진주파수에서 이득값을 갖게 되어, 필터의 출력전압은 그것의 입력전압의 Q배가 된다. 더 높은 Q값은 더 높은 이득을 갖게 되어, 시스템에 부정적 영향을 미치게 되며, 필터를 포함한 전원의 출력 임피던스를 키워 전원소스의 안정적 운용에 영향을 미칠 수 있게 된다. 필터 설계시 일반적으로 받아들여지는 Q값의 타협점은 2~4로서, 더 낮은 Q값은 감쇄용 저항의 증대에 따른 시스템의 손실, 즉 효율저하 및 무게 증가를 초래하여 또 다른 문제를 야기하게 된다.

회로의 Q값은 -3dB 대역폭에 대한 중심주파수의 율 ( $\omega_0/BW$ )로서 정의되며, 또한 회로소자의 값으로도 정의될 수 있는데, 다음의 그림 1에 감쇄저항을 갖는 일단 필터 회로를 나타냈으며, 이 회로의 Q값을 식 (1)에 나타냈다.

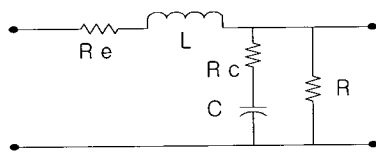


그림 1 감쇄용 저항을 갖는 일단 필터  
Fig. 1 Single stage filter with damping resistor

$$Q = \frac{Z}{R_{te}} \quad (1)$$

여기서  $Z = \sqrt{\frac{L}{C}}$

$$R_{te} = R_e + R_c + \frac{Z^2}{R}$$

### 2.2 필터와 시스템 안정성

전원소스는 필터를 달게 됨으로서, 실제로 불안정상태가 될 수 있다. 군사 분야의 EMI 엔지니어들은 CS101 시험을 통해 이 현상을 경험할 수 있다<sup>[4]</sup>. 이 시험에서 오디오 변압기가 시험대상 장비의 전원 입력선에 직렬로 연결되는데, 이는 시험대상 장비의 전원 입력단에 낮은 주파수의 신호를 결합시키기 위함이다. 초기 셋업 단계에서, 오디오 변압기의 1차 측을 종종 미종단(underterminated) 상태로 두게 되는데, 이때 변압기는 전원소스에 매우 큰 인덕턴스로 나타나게 된다. 이와 같은 높은 인덕턴스는 전원소스를 발전시키기에 충분한 요인이 된다. 부하단 전원의 라인필터 또한 어떤 한정된 조건 아래에서는 전원소스를 발전시킬 수 있게 된다. Cuk과 Middlebrook이 이 분야에 대한 많은 해석적 분석을 수행해 왔다. 이 현상을 설명하는데 두개의 직관적 접근이 있는데, 하나는 부성저항 발전이며, 다른 하나는 낮아지는 루프이득(loop gain)이다.

#### 2.2.1 부성저항 발전

부하단의 컨버터가 특정 주파수에서 부성저항 입력 특성을 갖고, 그리고 필터를 포함한 전원소스가 양성 임피던스 특성을 갖는다면, 부성저항 발전의 조건이 성립되게 된다. 컨버터의 부성 입력 임피던스 특성을 갖는 것은 쉽게 설명이 되는데, 이는 컨버터의 입력 전압이 내려가게 되면, 동일 전력을 유지하기 위해 더 많은 전류를 요구하게 되는 점에서 확인할 수 있다.

발전이 존재할 조건으로서, 컨버터는 부성 입력저항 특성을 가져야 하며, 필터는 반드시 큰 양성 저항을 가져야 한다. Middlebrook은 안정성의 일반적 기준을 다음 식 (2)을 통해 제시하고 있다. 이 식으로부터 소스의 임피던스는 작아야 하며, 부하의 임피던스는 커야 됨을 알 수 있다. 그리고 부하단 컨버터의 높은 승압비는 전체 시스템의 안정성에 부정적 영향을 미침을 또한 보여주고 있다. 따라서 부하단에 높은 승압비를 갖는 컨버터의 적용에는 면밀한 분석과 주의가 요구되며, 실제 고승압 컨버터가 적용된 시스템 시험에서 전류요동과 비정상 전압상승이 동시에 발생한 사례가 제시된 바 있다<sup>[2,3,5]</sup>.

$$\frac{|Z_S|}{|\mu^2 \cdot Z_O|} \ll 1 \quad (2)$$

여기서  $Z_S$  : 소스 임피던스 (필터 포함)

$$\mu = \frac{V_{in}}{V_{out}} \quad (\text{컨버터의 입출력 전압비})$$

$Z_O$  : 부하 임피던스

안정성 문제는 높은 Q값을 갖는 필터의 공진주파수에서 일반적으로 증명되는데, 이때 필터의 임피던스는 필터의 특성 임피던스의 약 10~100배까지 나타나게 된다. 따라서 비감쇠(undamped) 필터는 전원소스 발전에 필요한 조건을 만족하게 된다.

안정성 개념의 핵심은 부하단 컨버터의 입력 임피던스와 필터를 포함한 전원소스의 출력 임피던스를 비교하는 것이다. 다음의 그림 2에 전원소스의 출력 임피던스와 부하단 컨버터의 입력 임피던스 사이의 상호작용에 따른 시스템 안정성 문제를 제시하였다. 따라서 시스템 안정성 확보를 위해, 전원소스와 부하단 컨버터의 임피던스가 겹쳐지지 않기 위한 설계가 필수적 요소가 된다. 그리고 전원소스와 부하단의 공진주파수가 또한 겹쳐지지 않도록 전원 소스의 공진주파수를 부하단보다 낮게 유지하여야 한다.

2.2.2 루프이득에 대한 필터의 영향

필터의 영향을 설명하는 또 다른 방법은 루프이득에 대한 필터의 영향을 파악하는 것이다. 높은 Q 값을 갖는 필터는 그것의 공진주파수 대역에서의 전원 소스 출력단 임피던스를 높인다. 이로 인해 제어루프 이득을 줄이게 되며, 심한 경우 해당 주파수에서 이득값이 1로 줄어들어 더 이상 제어를 할 수 없게 되며, 여기에 전체 위상 지연이 360°가 되면 시스템은 발진하게 된다. 따라서 전원소스의 제어루프 설계시 필터는 반드시 포함되어 설계되어야 하고, 필터의 Q값은 허용하는 범위에서 최소화하여야 한다.

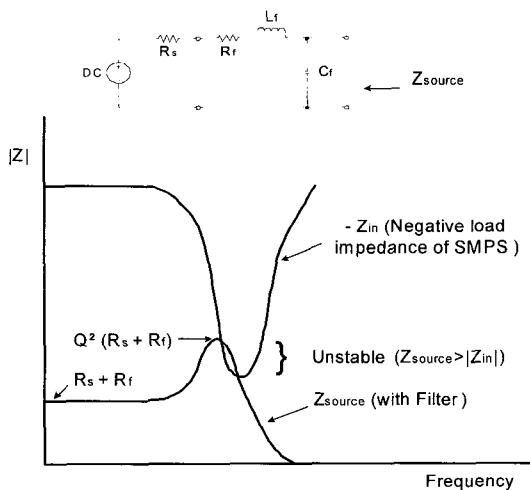


그림 2 근접한 공진주파수에서의 필터의 높은 Q에 인한 시스템 불안정성  
Fig. 2 Instability caused by high-Q filters close resonance

3. 단극발전기 평활필터 설계

3.1 단극 발전기

소형 가스터빈에 주로 적용되는 발전기의 한 종류인 단극발전기(Homo-Polar Generator, 이하 HPG)가 그것의 장점인 경량 및 고효율의 특징 및 관련 소재인 희토류의 개발에 따라 최근 군용 및 항공산업에서 재조명되고 있다.

1924년에 라퐼(Laffoon)은 단극 발전기의 동작을 가변 리럭턴스 머신(reluctance machine)으로서 설명하였는데, 이 머신내의 회전부인 톱니모양 로타는 필드코일에 의해 여자된 플럭스(flux)를 양(positive)의 방향 내 최소와 최대사이에서 맥동하게 한다. 전기자 권선에 유기되는 전압은 플럭스 쇄교(linkage)의 변화(dψ/dt)에 의해 발생된다<sup>[6]</sup>.

단극 발전기는 고속 회전시 내구성을 고려한 돌극(salience) 구조의 회전자, 전기자 권선, 정류기, 계자권선 등으로 구성되며, 계자전류를 제어하는 전압제어기(V/R) 및 맥동전압을 제거하는 평활필터는 발전기 일체형 또는 분리형으로 구성될 수 있다. 그림 3에 단극발전기의 구성도를 나타냈으며, 표 1에 본 연구에 적용된 단극발전기의 규격 및 특성을 나타냈다.

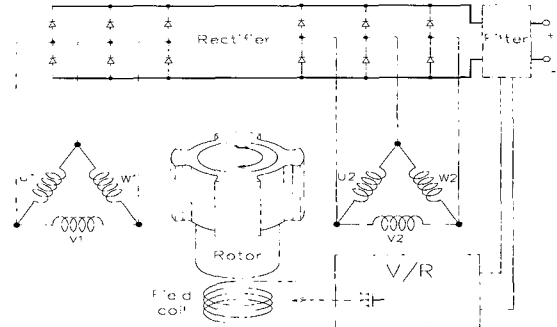


그림 3 단극 발전기 구성도  
Fig. 3 Diagram of HPG

표 1 단극발전기 규격 및 특성  
Table 1 Specification and characteristics of HPG

항목		규격 및 특성
규격	정격전압	30±1V
	정격용량	1.8kW (60A)
	RPM	24,900~35,600
특성	고정자 턴수	2
	slot 수	36
	극 (pole) 수	6
	필드 턴수	450

### 3.2 평활필터 설계방법

단극 발전기 내부 인자인 인덕턴스 및 저항성분이 반영된 저 성능인자 및 낮은 공진주파수 특성을 갖는 경량 평활필터 설계방법을 그림 4에 나타냈다.

발전기 출력단 인자 획득 방법은 발전기 개루프 특성에서 발전기 출력 저항값을 획득하며, 부하하강 과도특성에서 출력 인덕턴스값을 획득한다<sup>[7,8,9]</sup>. 필터에 적용될 인덕턴스값은 전원소스의 공진 주파수를 낮게 유지하도록 가용공간 내에서 산출값 보다 크게 적용한다. 그리고 성능인자 권장값 범위를 만족하는 커패시턴스 값을 계산하여 적용한다. 최종적으로 필터등의 인자값을 적용한 회로의 Q값 및 공진주파수값을 확인함으로써 필터의 설계내용을 검증한다.

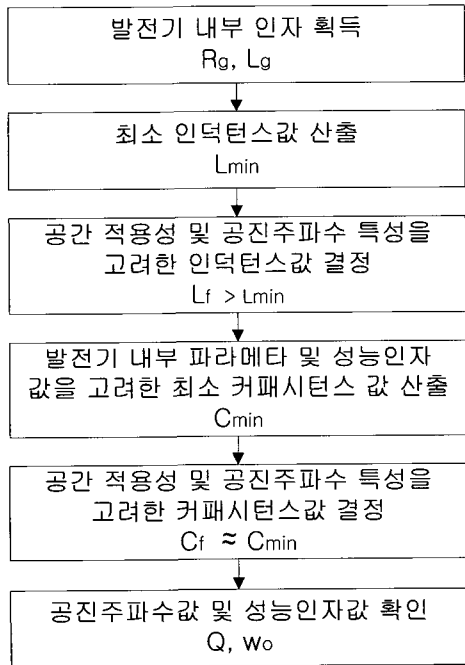


그림 4 단극 발전기용 평활필터 설계 절차  
Fig. 4 Design procedure of smoothing filter for HPG

### 3.3 단극 발전기 내부인자 획득

단극발전기의 내부인자인 등가 저항( $R_g$ )은 개루프 상태에서 부하변동에 따른 출력전압 강하특성인 식 (3)으로부터 얻는다. 본 연구에서는 평활필터 커패시턴스 계산에 가혹조건인 운용 최소(idle) RPM에서의 도출값(70mΩ)을 적용하였다.

그리고 발전기의 등가 인덕턴스( $L_g$ )는 과도상태 하 강응답에서 전류변화에 대한 출력단 커패시터의 전압

상승 특성에서 획득한다. 이는 발전기 출력단의 고저자 권선 인덕턴스에 저장된 에너지가 필터단의 커패시터로 넘겨지는 관계식으로, 식 (4)에 나타냈으며, 부하전류 50A에서 10A로 변화할 때의 변위전압 5.5V를 식 (4)에 대입하여 발전기 출력단 인덕턴스 값(16μH)를 획득하였다.

$$R = - \frac{dV}{dI} \tag{3}$$

$$\frac{L(\Delta I)^2}{2} = \frac{C(\Delta V)^2}{2} \tag{4}$$

### 3.4 평활필터 인덕턴스값 및 커패시터값 도출

평활필터의 최소 인덕턴스값을 식 (5)에 나타냈다<sup>[10]</sup>. 이 식은 3상 전파정류 시에 해당되는 관계식이며, 주파수는 발전기의 정류회로 전단 주파수로서 식 (6)에 따른다. 필터의 인덕턴스 값은 밀폐공간에 적용되는 평활필터용 커패시터의 맥동전류에 따른 열 문제 저감 및 공진주파수를 최대한 낮게 가져가기 위해 식 (5)에서 도출된 값 (0.6μH)보다 크면서 가용 공간에 적용 가능한 값으로 15μH를 적용하였다.

발전기 출력단 인자 및 평활필터의 인덕터를 포함한 설계 중간결과를 그림 5에 나타냈다. 성능인자 Q 값의 권장값을 만족하는 평활필터의 커패시턴스 값을 결정하기 위해서는 커패시터 전단의  $R_s - L_s$  직렬회로를  $R_p - L_p$  병렬회로로 등가변환을 해서 계산한다. 이 과정을 그림 6 및 식(7)에서 (10)까지에 나타냈으며, 이 변환과정에서 Q값은 권장치의 중간값인 3을 적용한다. 식 (10)에서 얻어진 커패시턴스 값은 624μF으로 실제 회로에는 공진주파수를 낮게 가져가기 위해 계산값보다 다소 큰 840μF(140μF×6개)을 적용하였다.

$$L_{f-min} = \frac{E_{dc}}{664 f \cdot I_{max}} \tag{5}$$

여기서  $E_{dc}$  : 직류 출력전압  
 $f$  : 라인 주파수  
 $I_{max}$  : 최대 부하전류

$$f = \frac{p \cdot n}{120} \tag{6}$$

여기서  $p$  : 극수  
 $n$  : RPM

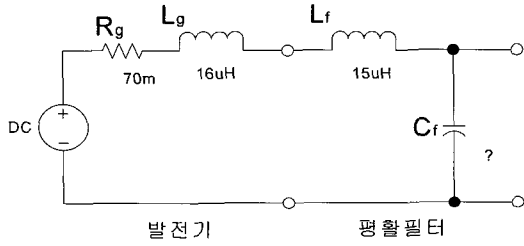


그림 5 발전기 인자를 포함한 평활필터 설계  
Fig. 5 smoothing filter design with generator parameter

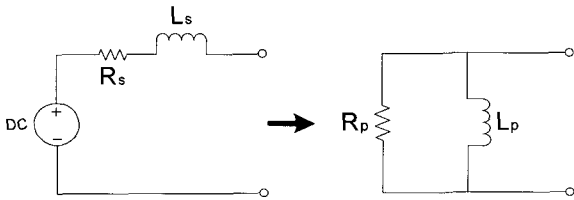


그림 6 특정 주파수에서의 등가 변환  
Fig. 6 equivalent transformation at one specific frequency

$$R_p = R_s (1 + Q^2) \tag{7}$$

$$X_p = X_s (1 + \frac{1}{Q^2}) \tag{8a}$$

$$L_p = L_s (1 + \frac{1}{Q^2}) \tag{8b}$$

$$Q = R_p \sqrt{\frac{C_f}{L_p}} \tag{9}$$

$$C_f = \frac{Q^2}{R_p^2} \cdot L_p \tag{10}$$

$$= \frac{3^2}{(10R_s)^2} \cdot 1.1L_s$$

최종 설계된 평활필터를 적용한 회로의 공진주파수를 확인하기 위한 관계식을 식 (11)에 나타냈으며, 이 식에 따른 회로의 공진주파수는 약 920Hz로 나타났다. 그리고 성능인자 Q 값을 식 (9)에 따라 확인하기 위해, 식 (11)에서의 공진주파수를 적용한 변환식을 식 (12), (13)에 각각 나타냈다. 식 (12) 및 (13)에서 구해진  $R_p$  (527mΩ) 및  $L_p$  (36μH)를 식 (9)에 적용해 확인한 성능인자 값은 2.6으로 권장값 범위 2-4를 만족하고 있다. 최종 제작 적용된 평활필터 형상을 그림 7에 나타냈으며, 최대 RPM, 정격 최대부하에서의 평활 특성 실험파형을 그림 8에 나타냈다.

$$w_0 = \sqrt{\frac{1}{L_s C_f} - (\frac{R_g}{L_s})^2} \tag{11}$$

여기서  $L_s = L_g + L_f$

$$R_p = \frac{R_g^2 + X_s^2}{R_g} \tag{12}$$

여기서  $X_s = w_0 L_s$

$$X_p = \frac{R_g^2 + X_s^2}{X_s} \tag{13}$$

여기서  $X_p = w_0 L_p$

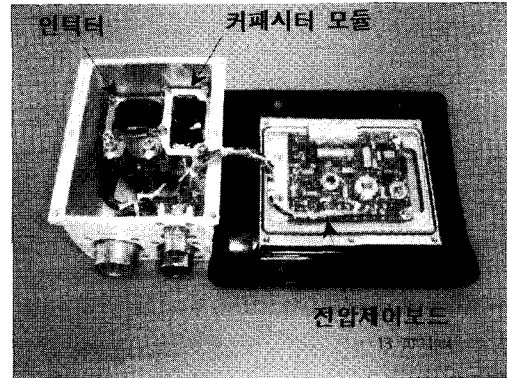


그림 7 전압제어보드를 포함한 평활필터  
Fig. 7 Smoothing filter with voltage control PCB

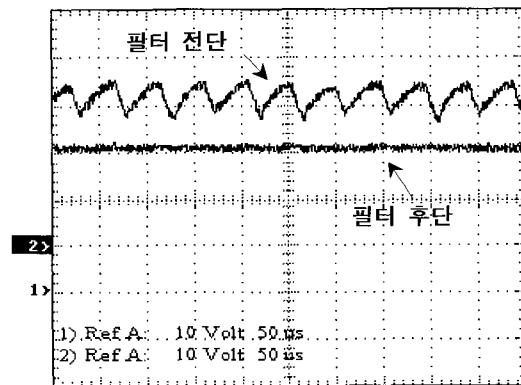


그림 8 평활필터 전, 후단의 전압파형  
Fig. 8 Voltage waveform at the input, output stage of Smoothing filter

### 3.5 기존 방식의 평활필터 설계 비교

발전기 내부 인자 값들을 적용하지 않고, 기존의 설계방법을 적용한 평활필터 설계 내용을 그림 9(a)에 나타냈다. 필터의 L값은 식(5)에서 얻은 최소값에 5배

의 여유를 갖는 3.0μH를 반영하였고, C값은 맥동주파수에서의 공진을 피하기 위해  $w_r^2 LC$ 가 2보다 크게 가져가는 관계식<sup>[9]</sup>에서 찾은 300μF를 적용하였으며, 여기서  $w_r$ 은 감쇄시킬 맥동전압의 각 주파수이다. 발전기 내부 인자 값들을 포함한 평활필터 설계결과를 그림 9 (b)에 함께 나타냈다. 그리고 그림 9의 발전기를 포함한 두 필터회로 출력단에서의 임피던스 특성을 그림 10에 나타냈다.

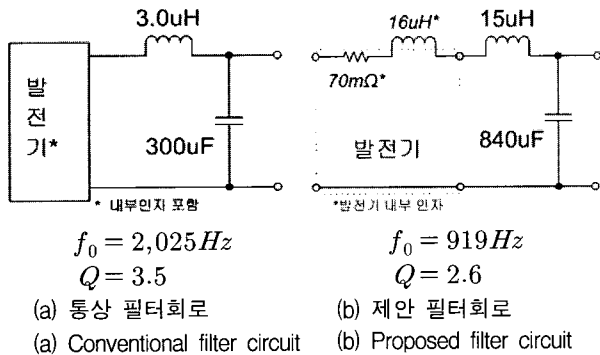


그림 9 기존방식과의 평활필터 설계 비교  
 Fig. 9 Comparison of smoothing filter design with conventional method

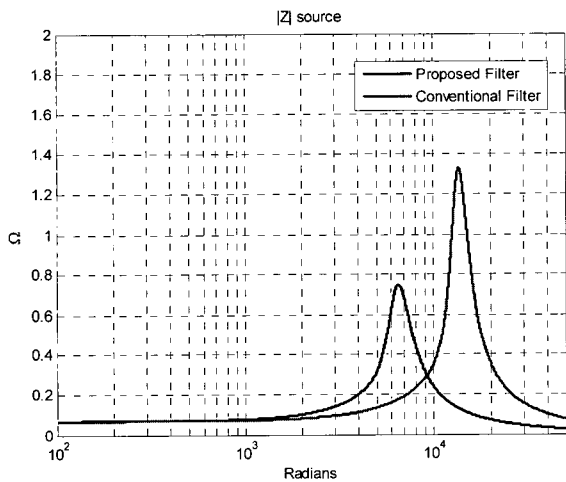


그림 10 임피던스 특성 비교  
 Fig. 10 Comparison of impedance characteristics

그림 10에서 제안된 필터회로의 임피던스 및 공진주파수 특성이 우수함을 확인할 수 있으며, 통상의 필터회로에서 Q값을 3이하로 낮추기 위해서는 감쇄용 직렬저항 약 10mΩ이 요구되는데, 이는 약 40watt의 불필요한 손실을 초래한다. 반면 제안된 평활필터 설계

방법은 단극 발전기의 내부 인자 값을 적용함으로써 부가의 감쇄용 저항 없이 Q값을 3이하로 낮추어 임피던스 특성을 향상시켰고, 공진주파수도 함께 낮추어 그림 2에서 언급한 부하단의 높은 공진주파수와 겹치는 것을 방지하여 시스템의 안정성을 향상시켰다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 평활필터 설계시 고려해야 될 항목 중 성능인자 권장값을 만족시키기 위해 단극 발전기의 내부 인자 값을 필터회로 설계에 반영하는 새로운 설계 방법을 제안하였다. 이 방법을 통해 통상의 필터회로보다 우수한 임피던스 특성을 갖게 하였으며, 성능인자와 함께 공진주파수도 낮추어 적용함으로써 시스템의 안정성을 증대시키는 방안을 제시하였다.

최근 고승압 컨버터 부하등을 포함한 부하조건 다양화로 인해 전원계통의 안정성에 대한 관심이 높아지는 현실에서, 향후 이와 관련된 분야에 대한 지속적인 연구발전이 필요할 것으로 판단된다.

#### 참 고 문 헌

- [1] Mark I. Nave, "Power Line Filter Design for Switched-Mode Power Supply," Van Nostrand Reinhold, 1991.
- [2] 김인수, 윤현로, "엔진 발전기 성능개선 연구," 연구보고서 MADC-410-040092, 국방과학연구소, 2004.
- [3] 김인수, 윤현로, "소형 가스터빈 엔진용 발전기 성능개선 및 모델링 연구," 군사과학 기술학회지 제7권 제3호, 2004.
- [4] 김인수 "호모폴 발전기 과도특성 개선 연구," 연구보고서 MADC-S416-05030, 국방과학연구소, 2005.
- [5] Jadric I, Borojevic D, Jadric M, "Modeling and Control of a Synchronous Generator with an Active DC Load", *IEEE Trans. Power Electronics*, vol. 15, no. 2, pp.303-311, 2000, Mar.
- [6] Edward A. Erdelyi, "Synthesis of High Speed Homopolar Alternators and Theory of Solid Rotor Electrical Machines", 1970, Dec.
- [7] 김인수, 성세진, "단극발전기의 모델링 및 시뮬레이션을 이용한 성능개선," *전력전자학회 논문지* 제 12권 제 3호, 2007.
- [8] Kim, I. S., Choi. D. K., Choi. S. H. and Seong S. J., "Modeling, Simulation and Analysis of a Homopolar Generator with Input Limiter", *IEEE IEMDC 2005 Paper*, 2005.

- [9] William G. Dunbar, Sidney W. Silverman, "Cruise Technology, Boeing Aerospace Company, March. 19 Missile Power System", Electrical Power System
- [10] William M. Flanagan, "Handbook of Transformer Applications," McGraw-Hill Book Company, 1986.

부록. 인덕터 설계/제작

항목	기호	규격	비고	
설계규격	인덕턴스	$L$	15 $\mu$ H	
	직류전류	$I_o$	60A	
	교류전류	$\Delta I$	9A	
	자속밀도	$B_m$	2.35T	
	온도상승	-	25 $^{\circ}$ C	밀폐환경
	Core재료	-	Cobalt steel	
	Core형상	-	EI Lamination	EI5042 : 42 $\times$ 50 $\times$ 15
설계결과	턴수	$N$	5	
	Air Gap	$l_g$	0.047cm	
	동판 size		1.1t $\times$ 20mm	
	자속밀도	$B$	0.87T	허용치:2.35T
	발열_D C @1m $\Omega$		3.6W	총 발열량: 약 9W
	발열_AC		약 5W	

저 자 소 개



**김인수(金仁秀)**

1962년 1월 30일생. 1984년 경북대 전자공학과 졸업. 1996년 충남대 전기공학과 졸업(석사). 2002년~현재 충남대 정보통신공학부 박사과정. 1984년~현재 국방과학연구소 책임연구원.



**성세진(成世鎭)**

1948년 7월 15일생. 1973년 서울대 공업교육과 졸업. 1975년 동 대학원 졸업(석사). 1988년 일본 동경공업대 대학원 졸업(공학). 현재 충남대 정보통신공학부 교수. 2001년 당 학회 회장 역임.