

전자기형 리타더의 전력회수장치 및 전압제어

정성철¹, 윤인식¹, 고종선[†]

Electromagnetic Retarder's Power Recovery Device and Voltage Control

Sung-Chul Jung¹, In-Sik Yoon¹, and Jong-Sun Ko[†]

Abstract

Usually, large-sized buses and trucks have a very high load. In addition, frequent braking during downhill or long-distance driving, causes the conventional method using the brake friction to have a problem in safety because of brake fade and brake burst phenomenon. Auxiliary brakes dividing the braking load is essential. Hence, environment-friendly auxiliary brakes, such as contactless brake rather than the engine auxiliary brake system are needed. A study aimed at improving the energy efficiency by recharging electric energy with changing mechanical to electrical energy that occurs when braking is actively in progress. In this paper, the voltage control method is utilized to recover the electric energy generated in the electromagnetic retarder instead of the eddy current. To regenerate the braking energy into the electrical energy, the resonant L-C circuit is configured in the retarder. The voltage generated in the retarder is simply modeled as a transformer. However, retarder voltage control in this paper is simulated by modeling the induction generator because this induction generator modeling is more practical than transformer modeling. The changes in the voltage of the resonance circuit, which depends on the switch pulse duration of the control device, were analyzed. A PI controller algorithm to control this voltage is proposed. The feasibility of modeling retarder and voltage controller are shown by using MATLAB Simulink in this paper.

Key words: Retarder, Energy recovery, Voltage control, Resonance circuit, SEIG(Self-Excited Induction Generators)

1. 서 론

중대형 차량 분야는 전체 총 차량으로 보면 작은 부분을 차지하지만, 도로 수송에서 총 연료 및 에너지 소비로는 많은 부분을 차지한다. 비교적 연비가 낮고, 연간 장거리를 다니기 때문에 중대형차량의 에너지 절약은 필수적이다. 그리고 중대형차량의 제동장치(Brake system)는 주행 중인 자동차를 감속 또는 정지시키거나 정지된 상태를 유지하기 위한 장치로, 자동차의 운동에너지를 열에너지로 바꾸어 공기 중으로 발산시키는 마

찰식 브레이크가 많다. 중대형 차량은 부하가 크기 때문에 제동하기 어렵고 내리막에서의 잦은 제동 및 장거리 운행 시의 경우 브레이크 파열 및 페이드 현상이 일어날 수 있다. 따라서 제동 안정성을 위해 보조브레이크를 사용하는데 그 중 하나가 전자기형 리타더이다^{[1][2]}. 기존 연구된 리타더는 구동방식에 따라 유체마찰을 이용해서 제동을 하는 유체식 리타더와 와전류를 이용하여 열에너지로 전환하는 방식인 전기식 리타더 등으로 분류된다. 전기식 리타더는 비접촉식으로 소음이 거의 없으며 제동 응답성이 빠르다는 장점이 있다^[1].

본 논문에서는 기존 전기식 리타더에서 제동에너지를 회수하는 기술을 접목시키는 전자기형 리타더 연구에서 전압제어에 대해 논한다. 이 리타더는 자동차가 주행 중에 브레이크가 필요한 경우 이 운동에너지를 전기적 발전을 시킨 후 와전류를 통해 드럼에서 열로 소진시킨다. 이와 더불어 L-C공진을 이용하면 전기적 에너지로 변환시키기 더 용이하게 된다. L-C공진을 이용한 회생제동 원리는 회전자(Drum)의 잔류자기에 의해 코일에 전압을

Paper number: TKPE-2016-21-5-4

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: jsko@dankook.ac.kr, Dept. of Electrical & Electronic Engineering, Dankook University
Tel: +82-31-8005-3602 Fax: +82-31-603-7253

¹ Dept. of Electrical & Electronic Engineering, Dankook University

Manuscript received Aug. 4, 2016; revised Aug. 22, 2016; accepted Sep. 1, 2016

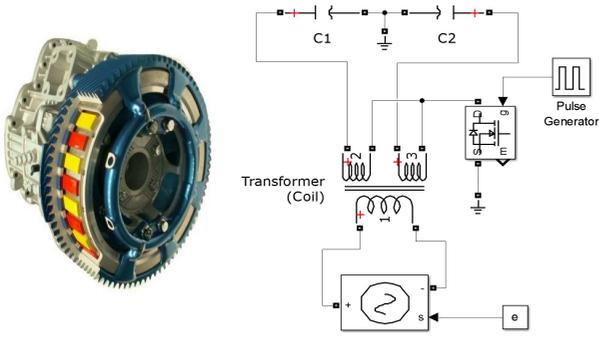


Fig. 1. Retarder's structure and regenerative braking system applied L-C circuit.

유도하고 공진에 의해 3상 교류전원이 발생하게 된다. 이 전류에 의해 회전자계가 생성 되는데, 이 회전자계와 회전자 속도 차에 의한 와전류가 회전자에 발생하게 되면 와전류의 전기적 에너지 손실 i^2R_c 에 의하여 제동력이 발생된다. 이 제동에너지 일부를 전기에너지로 회생하여 에너지를 절감할 수 있다. 이 회생에너지의 3상 전압은 컨버터를 통해 배터리에 충전하거나 직접 대형차량의 교류부하에 대해 적용할 수 있다.

본 연구에서는 리타더를 SEIG로 모델링하였고, 리타더에서 발생하는 전압 제어 방법을 다룬다. 그리고 발생하는 전압을 제어함으로써 3상 AC/DC컨버터 및 DC/DC컨버터를 통한 배터리의 충전을 극대화한다. 또, 전자기형 리타더는 SEIG로 모델링할 수 있기 때문에 기존 리타더와 달리 전원 공급을 따로 하지 않아도 동작할 수 있다^[3]. 그러므로 전기자동차의 전기에너지 소모를 줄일 수 있다. 이는 곧 전기자동차의 주행가능거리를 늘리는 효과가 있다. 리타더 코일에 유도되는 전압은 자동차의 속도에 따라 크기와 주파수의 변동이 생긴다^[4]. 시뮬레이션을 통해 전압 값이 효율이 좋고, 에너지 회수가 용이한 L, C의 소자 값과 스위치 제어 알고리즘을 파악한다. 그리고 제어알고리즘에 따라 PI제어기를 통해 전압을 제어하는 제어기를 제안하였다. 이 공진으로 얻어진 전압은 차량내부에서 사용되며 동시에 제동력을 얻게 된다. 결과적으로 제동에너지를 회수함으로써 풋 브레이크와 리타더의 온도상승을 막을 수 있다.

2. 리타더의 모델링 및 구동 파라미터 설계

다음 그림 1은 리타더의 구조와 유도되는 전압에 대한 간단한 모델링에 대한 그림이다.

리타더의 구조의 고정자측은 코일, 전자석, 콘텐서, 통합제어기로 구성되어있다. 고정자 코일은 여자시키고 발전하는 기능을 담당한다. 고정자에 연결된 콘텐서는 고정자의 코일에 직렬 연결하여 공진을 이용한 발전에 사용된다. 회전자측은 드럼으로 구성되어 있는데 이 회전자의 잔류자기가 남아 있고 회전자가 회전하게 되면 코일에 전압 유도된다. 그것에 의하여 L-C공진에 의한 교류 전원 발생이 된다. 이 전원 발생으로 회전자에 잔류

자기가 더 크게 만들어지게 되고 마찬가지로 코일에 유도되는 전압도 커지게 되어 B-H 곡선에 의해 포화상태까지 발전한다. 이때 회전자계와 회전자의 속도 차에 의해 와전류가 발생하게 되어 제동력이 생기는 것과 동시에 발전된 전압을 회수하는 것이 L-C공진을 응용한 회생제동 원리이다. 코일에 유도되는 전압만을 간단히 모델링하면 그림 1의 오른쪽과 같이 변압기로 모델링할 수 있다. 하지만 좀 더 실제적으로 모델링하면 리타더의 원리로 인해 SEIG로 모델링 할 수 있다. 따라서 기존의 리타더와 다르게 전기에너지를 공급하지 않고 오히려 제동에너지를 전기에너지로 회수할 수 있다.

SEIG로 동작하기 위해 커패시터가 직렬로 연결된 유도발전기의 상태방정식을 보면 다음 식(1)과 같다^[5].

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s + 1/pC & 0 & pL_m & 0 \\ 0 & R_s + pL_s + 1/pC & 0 & pL_m \\ pL_m & -\omega_r L_m & R_r + pL_r & -\omega_r L_r \\ \omega_r L_m & pL_m & \omega_r L_r & R_r + pL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \\ v_{qr} \\ v_{dr} \end{bmatrix} \quad (1)$$

식 (1)에서 R_s 는 고정자 저항, R_r 는 회전자 저항, $L_s = L_{sl} + L_m$, $L_r = L_{rl} + L_m$ 이며 L_{sl} 는 고정자 누설 인덕턴스, L_{rl} 는 회전자 누설 인덕턴스, L_m 은 자화 인덕턴스, $p = d/dt$, C 는 고정자 측 무효전력을 공급하고 공진을 위한 커패시터이며, ω_r 은 회전자의 전기각주파수이다.

식 (1)에서 $[i] = [Z]^{-1}[v]$ 형태로 정리한 후 자여자(Self-excitation)에 관여하는 i_{ds} 는 v_{ds} 의 초기 값이 0이기 때문에 i_{ds} 가 존재하기 위해서는 Z 의 행렬식이 0이어야 한다^{[6][7]}. Z 의 행렬식을 구하면 다음 식 (2)와 같다.

$$\det(Z) = Ap^6 + Bp^5 + Dp^4 + Ep^3 + Fp^2 + Gp + H = 0$$

$$\begin{aligned} \text{where } A &= C^2 L_m^4 - 2 * C^2 L_m^2 L_r L_s + C^2 L_r^2 L_s^2 \\ B &= -2R_s C^2 L_m^2 L_r - 2R_r C^2 L_m^2 L_s \\ &\quad + 2R_s C^2 L_r^2 L_s + 2R_r C^2 L_r L_s^2 \\ D &= C^2 L_m^4 \omega_e^2 - 2C^2 L_m^2 L_r L_s \omega_e^2 \\ &\quad - 2C^2 L_m^2 R_r R_s + C^2 L_r^2 L_s^2 \omega_e^2 \\ &\quad + C^2 L_r^2 R_s^2 + 4C^2 L_r L_s R_r R_s \\ &\quad + C^2 L_s^2 R_r^2 - 2CL_m^2 L_r + 2CL_r^2 L_s \\ E &= -2C^2 L_m^2 L_r R_s \omega_e^2 + 2L_s C^2 L_r^2 R_s \omega_e^2 \\ &\quad + 2C^2 L_r R_r R_s^2 + 2L_s C^2 R_r^2 R_s \\ &\quad - 2CL_m^2 R_r + 2CL_r^2 R_s + 4L_s CL_r R_r \\ F &= C^2 L_r^2 R_s^2 \omega_e^2 + C^2 R_r^2 R_s^2 - 2CL_m^2 L_r \omega_e^2 \\ &\quad + 2L_s CL_r^2 \omega_e^2 + 4CL_r R_r R_s + 2L_s CR_r^2 + L_r^2 \\ G &= 2CR_s L_r^2 \omega_e^2 + 2L_r R_r + 2CR_s R_r^2 \\ H &= L_r^2 \omega_e^2 + R_r^2 \end{aligned} \quad (2)$$

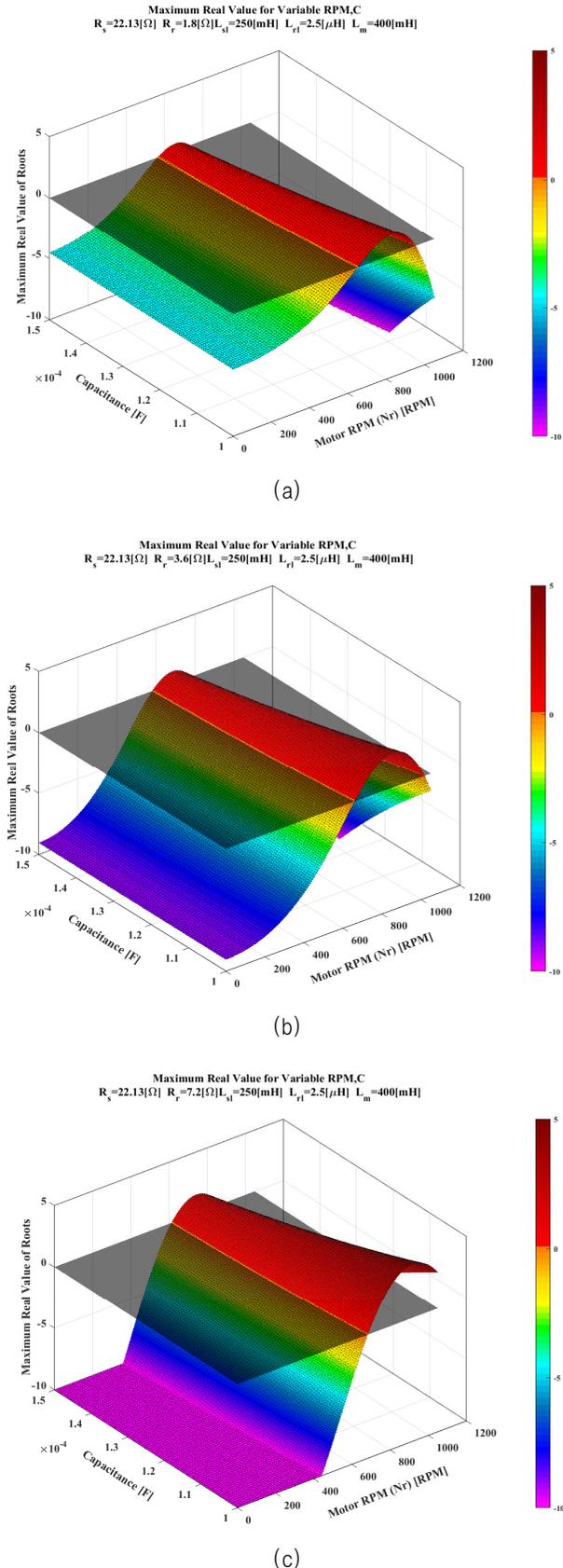


Fig. 2. Roots of determinant of Z for capacitance and motor RPM (a) 50% of R_r , (b) 100% of R_r , (c) 200% of R_r .

본래 Z의 행렬식을 구하면 8차 다항식이 나오지만 수학적으로 식을 정리하면 위 식(2)와 같이 6차 다항식으로 줄일 수 있다^[5]. 초기 과도상태인 미분방정식의 해 $i = Ke^{pt}$ 에서 초기 값 K는 발전기의 잔류자기에 관여되어 있다. 잔류자기가 존재한다면 $K \neq 0$ 이고 $\det(Z)=0$ 일 때의 근을 구하고 이때의 근의 실수부가 하나라도 양수에 있으면 지수적으로 증가하므로 i 가 증가하여 자여자 발전이 가능하다^[6]. 하지만 전류는 계속 증가하지 않고 B-H 곡선에서 포화되어 근의 실수부가 0이 되는 방향으로 L_m 이 변화한다.

따라서 SEIG로 동작하기 위해 실제적으로 파라미터 값을 설계할 수 있는 커패시턴스와 속도를 변수로 하고 Z의 행렬식의 근의 실수부가 양수가 나오는지 확인하였다. 다음 파라미터들은 본 논문에서의 실험에 사용될 M-G set의 파라미터이다. $R_s=22.13 [\Omega]$, $R_r=3.6 [\Omega]$, $L_{sl}=250 [mH]$, $L_{rl}=2.5 [\mu H]$, $L_m=400 [mH]$ 의 값으로 한다. 하지만, 특히 R_r 의 경우 온도에 따른 변동성이 크므로 실제 시스템에서의 동작 온도 등의 조건을 고려하여 기존 3.6 $[\Omega]$ 의 50%값과 200%값일 경우도 고려하였다.

그림 2는 고정자 측의 커패시턴스와 모터 속도(RPM)에 변화에 따른 Z의 행렬식의 근의 실수부 중 최댓값을 표시한 3D Plotting한 그림이다. 특히, R_r 의 값에 변화도 고려하였다. 이 그림을 통하여 $C=125 [\mu F]$ 일 경우 속도 약 612~881 [RPM]에서 M-G set이 SEIG로 동작가능하다는 것을 확인할 수 있다.

그리고 R_r 이 커질수록 SEIG의 동작범위가 늘어나는 결과를 도출할 수 있다. 또 커패시턴스값을 작게하면 동작속도 범위가 늘어난다. 그러나 커패시터의 전압이 더 커지게 되고 스위칭 스트레스와 커패시터의 내압으로 인하여 커패시턴스 값은 적절하다고 판단되는 125 $[\mu F]$ 으로 선정하였다.

설계 시 자동차 주 속도에 따른 주파수를 계산하여 고정자의 L과 C의 값을 조정하여 공진주파수로 맞춰주면 L-C 공진회로에 최대 전압을 발전시킬 수 있다. 차량의 속도에 대한 전기주파수 f_e 는 다음 식 (3)으로 계산할 수 있다.

$$f_e = \frac{(km)}{(h)} \times \frac{1}{2\pi(rad)} \times \frac{1000(m)}{1(km)} \times \frac{1(h)}{3600(s)} \times \frac{1(rev)}{2\pi r(m)} \times \frac{2\pi(rad)}{1(rev)} \times \frac{poles}{2} \quad (3)$$

공진주파수 f_{res} 는 다음 식 (4)와 같다.

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (4)$$

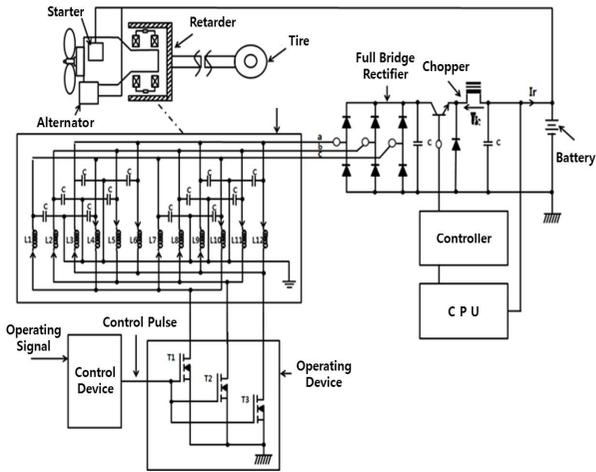


Fig. 3. Overall system for conventional retarder power recovery.

식 (3)과 식 (4)를 이용하여 리타더의 극 수, 차량의 바퀴의 반지름, 커패시턴스의 값을 선정할 수 있다. 본 논문에서는 반지름 0.2 [m], 극 수 4, 612~881 [RPM] 일 경우의 차량속도를 계산하면 46~66 [km/h]로 차량의 주 속도를 55 [km/h]로 가정하였으며, 실제 차량의 경우에도 반지름, 극 수와 차량의 주 속도를 고려하여 커패시턴스를 조정함으로써 동작속도범위를 정하여 각 파라미터 값을 설계할 수 있다. 이는 차량의 주 속도와 반지름 및 극 수에 따라서 현재 차량의 시속을 알 수 있고, 전기주파수를 구할 수 있으므로 차량의 주 속도와 공진주파수를 설계하여 공진을 잘 일으키기 위함이다. 따라서 차량의 주 속도를 고려하여 L, C, 극 수를 조절하면 높은 전압을 얻을 수 있다.

리타더는 발전을 위해 회전자계의 주파수는 회전자의 주파수보다 작으며, 주파수 차이에 의해 와전류가 생긴다. 그러므로 와전류 손실이 생기고 열이 나면서 기계에 너지가 다른 에너지로 바뀌게 되며 에너지회수와 제동을 동시에 할 수 있다. 회수한 전기에너지는 교류 부하에 대해 적용시킬 수 있고, AC/DC 컨버터 및 DC/DC 컨버터를 통하여 배터리에 저장할 수도 있다.

위 그림 3은 일반적으로 사용되는 회로로, 리타더에서 나오는 전력 회수를 위한 전체적인 시스템이다. 이 회로에서 배터리에 충전시키기에 용이한 전압으로 제어한다. 제어 방법은 그림처럼 스위치(FET 혹은 IGBT)의 온/오프를 작동펄스로 한다.

3. 시뮬레이션

리타더에서 나오는 전압을 배터리에 충전하거나 사용하기 용이한 전압으로 제어하는 제어기의 효율성을 보이기 위해 Matlab Simulink를 이용하였다. 리타더를 유도발전기로 모델링 하였고 실제 실험과 비슷한 포화모

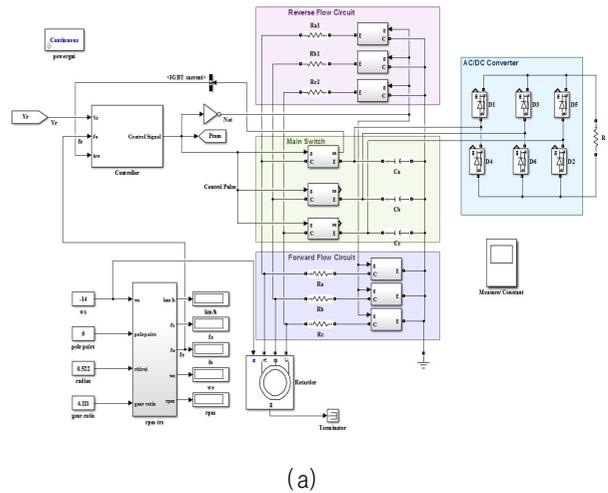


Fig. 4. Retarder voltage control simulator.

- (a) Overall Configuration
- (b) Controller Block Diagram

드를 적용하였다. 잔류자속은 초기 값 설정을 통하여 설정하였다. 그림 3은 제어기를 포함한 시뮬레이터의 개략도와 시뮬레이터에서 사용된 제어기의 블록 다이어그램이다.

그림 4 (a)는 전체적인 시뮬레이터 구성으로, 차량 속도를 계산해주는 부분, 제어기, 메인 스위치회로, 보조 스위치회로 SEIG, 커패시터, 3상AC/DC컨버터로 구성되어 있다. 그림 4(b)는 제어 블록다이어그램으로 속도에 따라 PI Duty제어 및 Reverse PI Duty제어를 한다.

시뮬레이션에 사용된 파라미터 값들은 다음 표 1와 같다.

여기서 Flow Resistance는 그림 3에서 Forward와 Reverse Flow Circuit에 있는 저항의 값으로, Main Switch가 Off상태에만 동작하게 되며 Off시에 스위치가 개방 상태가 되더라도 다른 회로 쪽으로 계속 전류가 흐르게 하여 스위치 전위 상승을 억제해준다. 부하저항(R_L)은 3상 AC/DC컨버터의 부하로써 본래 DC/DC컨버터를 거쳐 배터리에 충전하는 시스템이나 본 논문에서의 시뮬레이션에서는 간단히 저항으로 등가화 하였다.

TABLE I
PARAMETER VALUES FOR SIMULATION

Parameter	Values
Stator resistance	0.27 [Ω]
Rotor resistance	0.05837 [Ω]
Stator leakage inductance	37.29 [mH]
Rotor leakage inductance	867 [μ H]
Stator Capacitance	1700 [μ F]
Poles	9
Flow Resistance	100 [Ω]
Load Resistance	1000 [Ω]

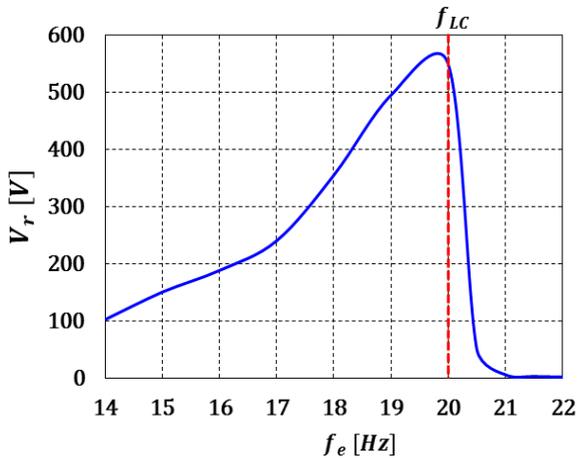


Fig. 5. Regulated voltage for voltage frequency.

위 그림 5는 리타더에서 발전된 전압의 주파수에 따른 AC/DC 컨버터를 통해 정류된 전압의 크기를 나타낸 그래프이다. 점선은 $f_{res}(f_{LC})$ 이며 L과 C값에 따른 공진주파수이다. 여기서 f_e 가 f_{res} 보다 작을 경우에는 정류된 발전전압이 비교적 작게 나오게 되고, f_e 가 f_{res} 비슷할 경우 정류된 발전전압이 크게 나온다. 그림 5에서 f_e 와 f_{res} 와 약간 다를 경우에 최대 전압이 나오는 이유는 유도발전기의 특성상 슬립으로 인하여 약간의 차이가 있다. 또, f_e 가 f_{res} 더 클 경우에는 커패시터가 무효전력을 공급할 수 없으므로 전압이 발전되지 않는다. 그리고 이 전기에너지를 회수하기 용이한 전압(300 [V])으로 제어하기 위해 스위치를 온/오프 시키는 펄스를 인가한다.

처음 스위치가 On상태를 유지할 경우 3상 전압이 발생한다. 그 후 여러 주파수와 듀티를 가진 펄스를 인가

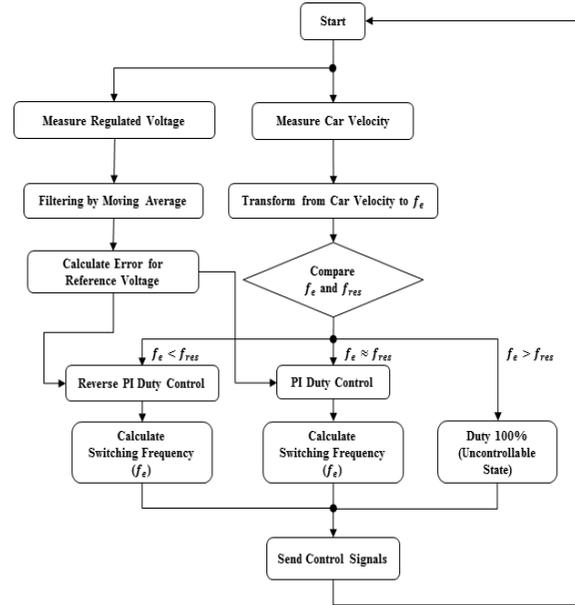


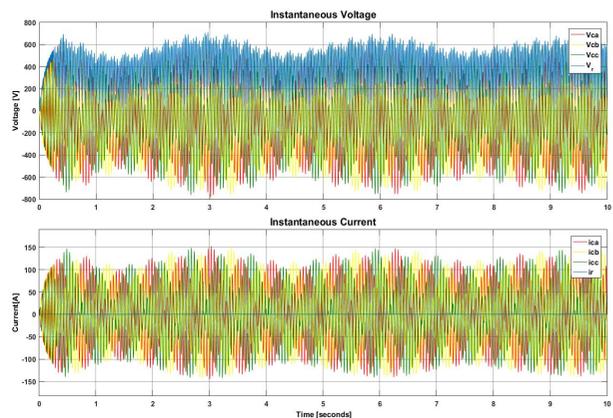
Fig. 6. Proposed retarder voltage controller algorithm.

해본 결과 펄스를 인가하게 되면 다른 주파수가 관여하게 되어 스위칭을 통해서 공진율을 바꿀 수 있다는 것이 연구되었다. 그리고 시뮬레이션을 통하여 그림 6과 같은 알고리즘으로 리타더의 전압을 제어 할 수 있었다.

차량속도에 따라 전압의 주파수(f_e :속도주파수)가 변하므로 전압의 주파수를 계산한 후 그 주파수와 공진주파수를 비교하여 오차가 클수록 듀티를 줄일 것인지 늘릴 것인지 판단한다. f_e 가 f_{res} 보다 작을 경우에는 듀티를 줄여서 공진율을 올려서 전압을 높게 되고 f_e 가 f_{res} 비슷할 경우 듀티를 늘리게 되면 공진을 계속하게 되므로 전압이 올라간다. f_e 가 f_{res} 보다 더 클 경우에는 발전이 되지 않으므로 스위치는 도통 상태를 유지한다. 듀티는 PI제어기를 적용하였고 f_e 가 f_{res} 보다 작을 경우에는 Reverse PI 듀티 제어, f_e 가 f_{res} 와 비슷할 경우에는 PI 듀티 제어를 한다. PI제어기에 입력인 오차 값은 정류된 전압을 측정하여 이동 평균을 통하여 필터링한 후에 기준 전압 300 [V]와의 차로 계산된다. 스위칭 주파수는 여러 시뮬레이션 결과 속도주파수와 같게 하는 것이 제어성이 가장 좋았다.

다음 그림은 시뮬레이션 결과 그림이다.

그림 7은 $f_e = 17.19[Hz]$ 일 경우의 시뮬레이션 결과로서 알고리즘에서 $f_e < f_{res}$ 경우에 속한다. f_e 와 f_{res} 가 비슷하지 않은 경우이므로 공진율이 낮기 때문에 스위치를 도통 상태만 유지할 경우 200 [V]로 결과가 나오지만 제어신호를 통하여 다른 주파수가 관여하여 공진율을 높이기 때문에 기준전압 300 [V]로 제어된 것으로 확인할 수 있다. 이 300 [V]는 DC/DC컨버터를 통하여 배터리 전압인 12 [V], 24 [V] 혹은 48 [V]로 변환된 후 배터리로 충전된다.



(a)

(b)

Fig. 7. Simulation result for $f_e = 17.19 [Hz]$.

- (a) Instantaneous Voltage, Current
- (b) Regulated Voltage, Control Signal

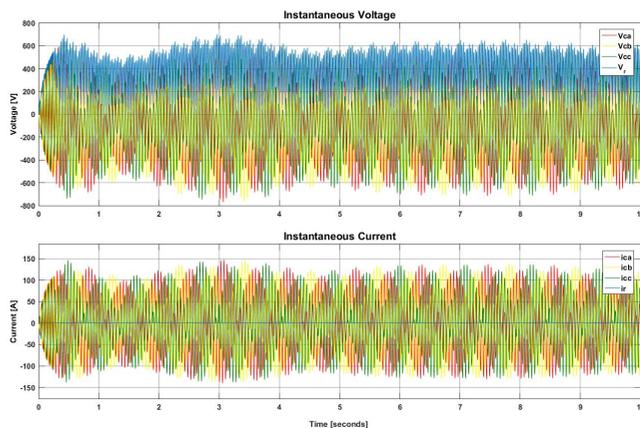
그림 8은 $f_e = 20.05 [Hz]$ 일 경우의 시뮬레이션 결과로 알고리즘에서 $f_e \approx f_{res}$ 경우에 속한다. f_e 와 f_{res} 가 비슷한 경우이므로 공진율이 높아서 스위치를 도통 상태만 유지할 경우 560 [V]로 결과가 나오지만 제어신호를 통하여 공진율을 낮춤으로써 기준전압 300 [V]로 제어된 것으로 확인할 수 있다.

5. 실험

본 논문에서는 제어 신호를 통해 커패시터의 전압 실효값을 측정하고 이 실험값을 시뮬레이션과의 비교하였다. 그리고 f_e 가 f_{res} 이 비슷할 경우 듀티가 작을수록 전압이 작아짐으로써 전압제어가 가능함을 확인하였다.

그림 9는 리타더의 축소 모형으로 M-G set이다.

Motor Driver를 통해 PMSM을 모터로 구동하게 되고 PMSM과 Induction Machine이 커플링 되어있다. 그리고 SEIG로 동작하기 위해서는 미리 Induction Machine이 모터로 동작을 해야 한다. 모터로 동작 후에



(a)

(b)

Fig. 8. Simulation result for $f_e = 20.05 [Hz]$.

- (a) Instantaneous Voltage, Current
- (b) Regulated Voltage, Control Signal



Fig. 9. Experimental configuration.

는 잔류자기가 있어서 SEIG로 동작할 수 있다. 또 무효 전력 공급 및 공진을 위하여 커패시터가 Induction

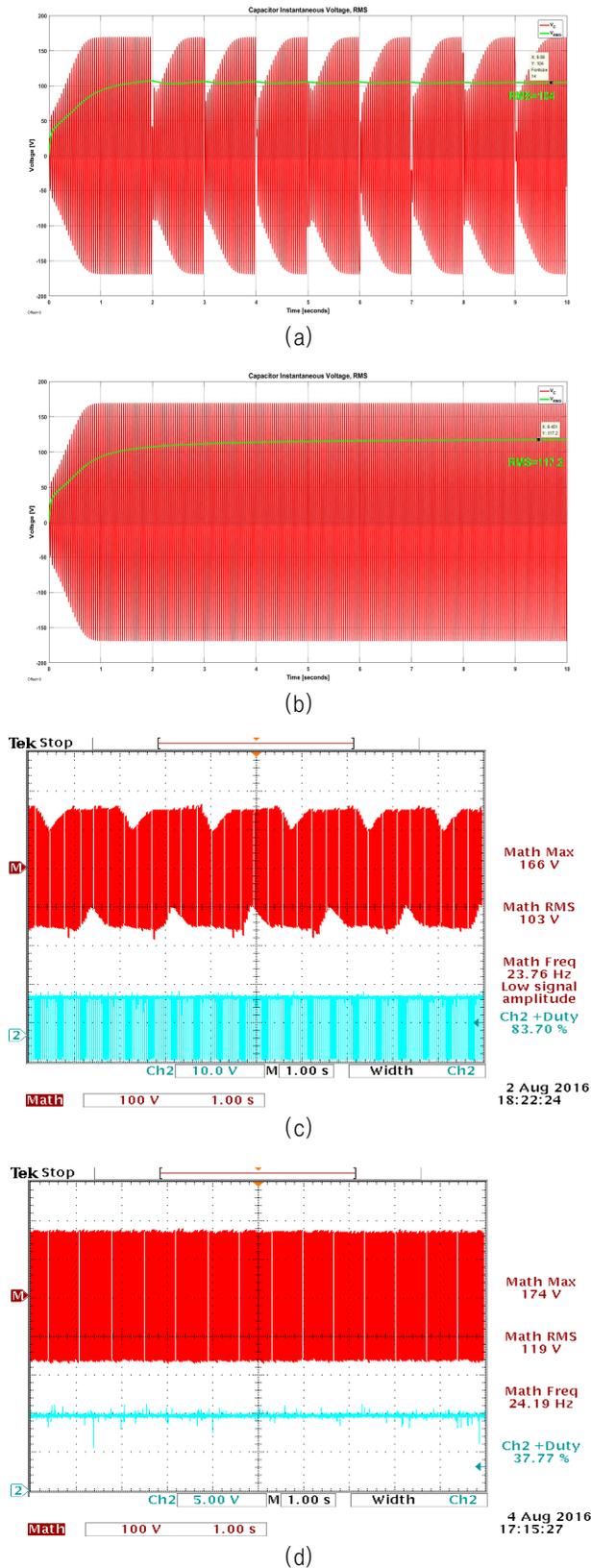


Fig. 10. (a) Capacitor Instantaneous Voltage by Switching (Simulation)
 (b) Capacitor Instantaneous Voltage by On State (Simulation)
 (c) Capacitor Instantaneous Voltage for by Switching (Experiment)
 (d) Capacitor Instantaneous Voltage by On State (Experiment)

Machine의 코일과 직렬 연결되어 있다. 또 전압 파형 관측을 위한 오실로스코프, 신호발생기를 통해 스위치소자인 FET의 게이트에 전압을 인가하며 DC/DC컨버터 입력 전의 3상 AC/DC 컨버터로 실험 구성이 되어 있다.

위 그림 10은 커패시터의 순시전압으로 시뮬레이션과 실험을 통한 그래프의 MATH는 커패시터의 전압 파형 및 Ch2는 게이트에 인가하는 제어신호의 파형이다. 위 그림 10(a),(b)는 시뮬레이션을 통한 커패시터의 순시전압과 실효값 파형이다. 실제 리타더처럼 전압 값이 약간의 시간이 걸린 후 부상된다. 그리고 (a)의 경우 스위칭을 통하여 실험값과 비슷한 전압 실효값이 104 [V]가 된다. (b)는 스위치를 도통 상태를 유지하였을 때의 전압 파형으로 전압 실효값이 117.2 [V]가 된다. 그림 10(c),(d)는 실험을 통한 그래프로 그림에서 MATH채널은 커패시터의 전압 Ch2는 게이트 인가한 전압이다. (c)의 경우 스위칭을 통하여 실험값과 비슷한 전압 실효값이 104 [V]가 된다. (d)는 스위치를 도통 상태를 유지하였을 때의 전압 파형으로 전압 실효값이 119 [V]가 된다. 시뮬레이션과 실험이 매우 근접한 실효값을 가짐을 알 수 있다. 즉, 제어신호의 듀티와 주파수에 따라 전압이 변한다.

6. 결 론

본 논문에서는 리타더의 원리를 설명하고 SEIG로 모델링하고 파라미터 값을 설계하였다. 그리고 시뮬레이션을 통해 리타더에 유도되는 전압을 사용하기 용이한 전압으로 제어하였다. 차량의 주 속도에서 에너지가 집중적으로 회수할 수 있도록 공진주파수와 비슷할 경우에는 전압이 높게 유도되므로 공진율을 낮추어서 전압을 제어한다. 만일 제동으로 속도가 줄어서 공진주파수와 차이가 있더라도 제어신호를 통하여 전압을 제어하여 에너지를 최대한 회수할 수 있도록 하는 제어를 제안하였다. 실험에서는 시뮬레이션에서 증명된 알고리즘이 실제 사용 가능함을 보이고자 듀티와의 연관성을 보이도록 하였다. 즉 제어신호를 통하여 전압이 원하는 방향으로 바뀌는 것을 확인하였다. 향후 DSP를 통하여 전압을 실시간 제어하고자 한다.

This work was supported by the Energy Efficiency and Resources of the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning under Grant 2013T100200023 from the Ministry of Trade, Industry and Energy of Korea.

References

- [1] C. Y. Liu, K. J. Jiang, and Y. Zhang, "Design and use of an eddy current retarder in an automobile," *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 12, No. 4, pp 611-616, Aug. 2011.
- [2] K. Zhang, D. Li, R. Zheng, and W. Yin, "Design and performance of a self-excited and liquid-cooled electromagnetic retarder," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 64, No. 1, pp. 13-20, Jan. 2015.
- [3] R. C. Bansal, "Three-phase self-excited induction generators: an overview," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 20, No. 2, pp. 292-299, Jun. 2005.
- [4] S. C. Jung, C. H. Yoo, H. J. Jo, and J. S. Ko, "Voltage control for electromagnetic retarder's power recovery device," *Power Electronics Conference*, pp. 87-88, Jul. 2015.
- [5] D. Seyoum, C. Grantham, and M. F. Rahman, "The dynamic characteristics of an isolated self-excited induction generator driven by a wind turbine," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 39, No. 4, pp. 936-944, Jul./Aug. 2003.
- [6] C. Grantham, D. Sutanto, and B. Mismail, "Steady-state and transient analysis of self-excited induction generators," *IEE Proceedings*, Vol. 136, Pt. E, No. 2, Mar. 1989.
- [7] L. Wang and C. H. Lee, "A novel analysis on the performance of an isolated self-excited induction generator," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 12, No. 2, pp. 109-117, Jun. 1997.

**정성철(鄭性哲)**

1990년 10월 3일생. 2015년 단국대 전자전기공학과 졸업. 2015년~현재 동 대학원 전자전기공학과 석사과정.

**윤인식(尹仁植)**

1974년 11월 2일생. 1999년 단국대 전기공학과 졸업. 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2012년~현재 동 대학원 전자전기공학과 박사과정. (주)두크 기술연구소 연구소장.

**고종선(高宗宣)**

1960년 3월 20일생. 1984년 서울대 전기공학과 졸업. 1989년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1994년 동 대학원 전기 및 전자공학과 졸업(공학박). 1983년~1995년 삼성전자 생산기술센터 선임연구원. 1995년~1996년 삼성그룹 삼성경영기술대 사내 교수(부장). 1999년 2월~2000년 1월 미국 Tennessee 주립대(UT) Post-Doc. 1996년~2003년 7월 원광대 전기전자 및 정보공학부 조교수. 2003년 8월~현재 단국대 전자전기공학과 교수.