

전기추진함정의 전도성 EMI 저감을 위한 Drain wire의 적용 및 효과 검토

이대한, 김재석, 설승기
서울대학교 전기정보공학부

Conducted EMI Reduction in Electric Propulsion Ship Using Drain Wire

Dae Han Lee, Jae Seok Kim and Seung Ki Sul

Department of Electrical and Computer Engineering, Seoul National University

ABSTRACT

함정의 추진체제로 전기추진체제가 선정될 경우 대용량의 전동기 및 전력변환장치가 설치된다. 전동기를 구동하여 추진력을 얻기 위해서는 발전기에서 공급하는 AC 전력을 AC에서 DC 다시 DC에서 AC로 변환하는 과정을 거치게 된다. 이 과정에서 전력용 반도체의 On/Off 동작에 의해 높은 전압상승률(dv/dt)이 발생하며 이로 인해 함정의 선체를 통해 흐르는 누설전류가 발생하여 인접 장비에 영향을 미치게 된다. 본 논문에서는 전기추진 함정의 전자기 간섭(EMI) 현상 발생 원인에 대해 분석하고 이를 저감시키기 위한 방법으로 Drain wire를 적용하고 그 효과에 대해 분석한다.

1. 서론

최근 건조되고 있는 함정의 추진체제는 기존의 엔진 기계식 추진체제에서 전동기를 이용한 전기추진체제를 적용하는 추세로 변화하고 있다. 추진동기의 효율은 전 운전 영역에서 엔진에 비해 훨씬 높기 때문에 연료 소모량을 감소시킬 수 있으며, 함정의 특수성능 중 소음 및 진동 측면에서 유리하다. 한편, 함정의 추진력을 비롯한 함내 전 부하를 발전기에서 공급해야 하기 때문에 구축함의 경우 발전기의 전력용량이 수십 MW급으로 급증하게 되고, 고전압 고효율 장비의 운용에 따른 추가적인 보호 및 안전대책이 필요하다. 또한 대용량 전동기 및 전력변환장치를 탑재함에 따라 기계식 추진체제에서 발생하지 않았던 전동기의 Common mode 전압 및 누설전류에 의한 전자기 간섭(EMI) 현상이 발생하기 때문에 이에 대한 분석과 대책이 필요하다. 따라서 전기추진체제를 탑재하는 함정의 경우 설계단계부터 EMI에 대한 분석과 대책이 필수적이다. 본 논문에서는 전기추진함정의 EMI 현상에 대한 분석을 수행하여, 누설 전류에 의한 EMI 영향을 줄이기 위해 Drain wire를 적용한 후 그 적용 효과를 실험을 통해 확인하고 EMI 억제 효과를 이론적으로 분석한다.

2. 전기추진함정의 전도성 EMI

2.1 PWM 인버터의 Common mode 전압

함정 전동기 구동 시스템의 전도성 EMI를 발생시키는 Source는 PWM 인버터의 Common mode 전압이다. Common mode 전압은 그림 1에서와 같이 전동기의 중성점과 직류단 중성점의 전위차로 정의할 수 있다.

PWM 인버터의 Common mode 전압은 식 (1)과 같이 표시되며 각 상의 극전압(Pole voltage)으로 표현할 수 있으며, 극전압은 직류단 전압과 전력용 반도체의 스위칭 함수이다.

$$v_{sn} = \frac{1}{3}(v_{an} + v_{bn} + v_{cn}) \quad (1)$$

$$v_{sn} = \frac{V_{dc}}{3}(S_a + S_b + S_c) - \frac{V_{dc}}{2} \quad (2)$$

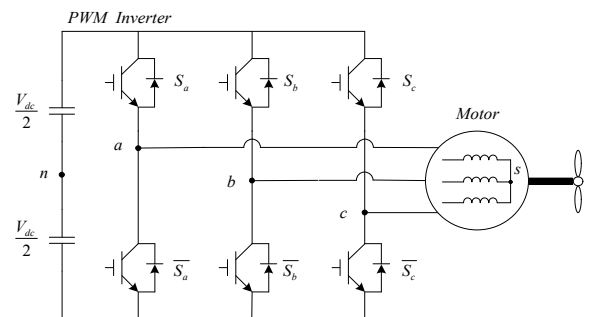


그림 1 3상 2레벨 PWM 인버터를 이용한 전동기 구동 시스템 따라서 식 (2)로부터 PWM 인버터의 common mode 전압은 전력용 반도체의 스위칭 상태와 직류단 전압의 크기와 관계가 있음을 알 수 있다.

2.2 Common mode 전압과 누설전류의 관계

PWM 인버터에서 Common mode 전압은 전력용 반도체의 스위칭 동작에 의해 필연적으로 발생하는 성분이며, Common mode 전압의 높은 전압 상승률로 인해 그림 2와 같이 인버터와 선체 사이의 표류(Stray) 캐패시터, 전동기와 선체 사이의 표류 캐패시터, 전동기와 인버터의 연결 전선과 선체사이의 표류 캐패시터에 의해 선체 전반에서 고주파의 누설전류가 발생한다. 이렇게 흐르게 되는 누설전류는 선체를 통해 함정 전반에 전달되어 무기체계 및 통신장비 등의 오작동을 유발할 가능성이 있다. 이러한 누설전류의 크기는 표류 캐패시턴스의 크기와 Common mode 전압의 변동률에 의해 아래 식과 같이 결정된다.

$$i_g = C_{stray} \frac{dv_{cm}}{dt} \quad (3)$$

따라서 누설전류의 크기를 감소시키기 위해서는 표류 캐패시턴스의 크기와 전압변동률을 감소시켜야 한다. 통상 표류 캐패시턴스는 인버터, 전동기, 전선의 배치와 구조에 의해 결정되므로 일정 이상으로 줄이기 어려우며, Common Mode 전압 상승률을 줄이기 위해 인버터 출력단의 전압 상승률을 줄일 경우 인버터 스위칭 소자의 손실이 과도해져 이 또한 적용이 제한된다.

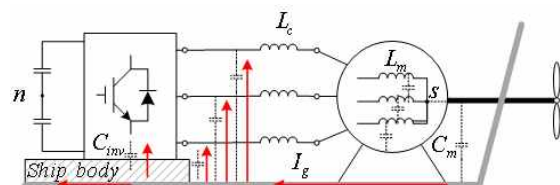


그림 2 Common mode 전압에 의한 누설전류 이동 경로

3. Drain wire 적용 및 효과 분석

3.1 Drain wire의 적용 개념

Drain wire는 그림 3에 보인 바와 같이 전동기 전력공급선에 병렬로 추가의 전선을 설치하여 선체 보다 Common Mode 임피던스가 적은 전류 경로를 제공하여 누설전류가 선체로 흐르지 않고 Drain wire로 흐르게 하는 목적으로 사용된다. 즉 전동기와 선체 간에 형성된 표류 캐패시터에 의해 흐르는 전류가 Drain wire로 흐름에 따라 전력공급선과 Drain wire 내부에서 누설전류가 순환한다.

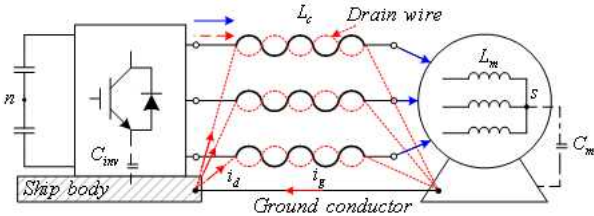


그림 3 Drain wire가 적용된 전동기 구동 시스템

3.2 Drain wire의 효과 분석

전력공급선과 Drain wire간에 형성된 표류 캐패시터는 그림 4와 같이 두 전선간 분포적으로 존재하게 된다.

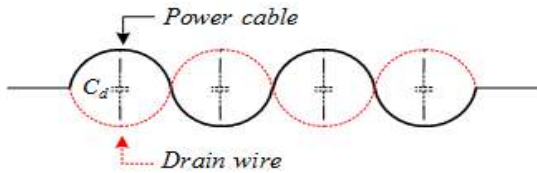


그림 4 전력공급선과 Drain wire간에 형성된 표류 캐패시터
전력공급선과 Drain wire간에 형성된 표류 캐패시터의 크기는 두 전선의 길이 및 전선간의 유전율이 같을 경우 두 전선간의 간격에 따라 표류 캐패시턴스의 값이 달라지며 가까이 배치할수록 식 (4)에 표시한 바와 같이 그 값이 커지게 된다.

$$C_d = \frac{\pi \epsilon l}{\ln \left(\frac{d}{2a} + \sqrt{\frac{d^2}{4a^2} - 1} \right)} \quad (4)$$

전력공급선과 Drain wire간에 형성된 표류 캐패시턴스는 기존의 인버터와 선체(C_{inv}), 전동기와 선체(C_m)간에 형성된 표류 캐패시턴스보다 훨씬 큰 값을 가지며, 각 캐패시터는 그림 5와 같이 병렬 연결되어 있다.

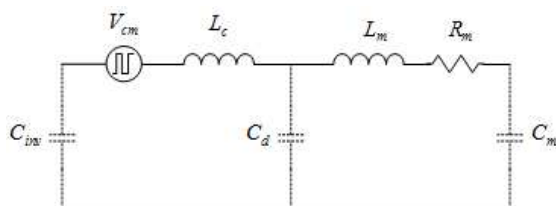


그림 5 Drain wire가 적용된 전동기 구동 시스템의 등가회로

결과적으로 전력공급선과 Drain wire간에 형성된 표류 캐패시터(C_d)는 Common mode 전압(V_{cm})에 의해 흐르는 누설전류 경로에 낮은 임피던스 경로를 제공함으로써 선체를 통해 흐르던 누설전류가 Drain wire로 집중되어 흐르게 된다. 반면에 C_d 의 추가는 등가회로상의 총 임피던스의 크기를 감소시키며, 이는 같은 전압원(V_{cm})에 대해 흐르는 누설전류량이 증가함을 의미한다. 즉 C_d 의 추가로 인해 인버터에서 출력하는 전류 중 고주파 전류 성분의 크기가 증가한다. 그러나 증가한 고주파 전류는 Drain wire에 의해 전동기 구동 시스템 내부에서만 순환하기 때문에 인접장비에 미치는 영향은 없으며 인버터나 전동기 정격 전류에 비해 매우 작은 값이다. 추가적으로 Drain

wire로 누설전류 성분이 집중됨에 따라 누설전류가 흐르는 Loop 면적이 기존의 선체를 통해 흐를 때 보다 대폭 감소하기 때문에 전류 Loop에 의한 추가적인 전자기 간섭 현상을 획기적으로 저감 할 수 있다.

4. 실험 결과

그림 6은 일반 전력공급선을 적용할 경우 전압, 전류 파형이다. Common mode 전압은 스위칭 순간에 $V_{dc}/3$ 크기의 계단파 형태로 변하며 이때 고주파 누설전류 성분이 발생함을 확인할 수 있다.

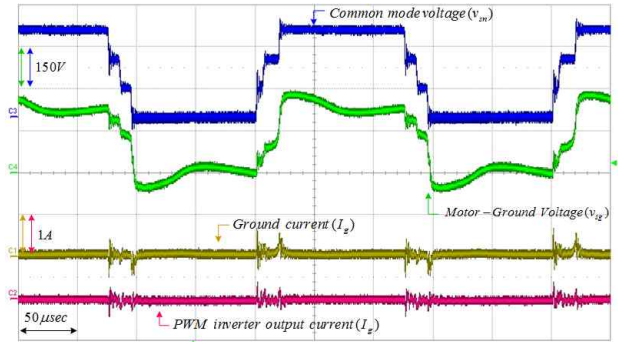


그림 6 일반 전력공급선을 적용한 경우의 전압, 전류

전력공급선에 Drain wire를 적용할 경우 그림 7과 같이 선체를 통해 흐르는 전류(I_g)의 크기는 일반 전력공급선을 적용했을 때 보다 RMS(Root Mean Square)값 기준 114mA → 68mA로 약 40% 감소한 결과를 얻을 수 있었으며, PWM 인버터의 출력 전류의 고주파 성분은 Drain wire의 설치로 임피던스가 감소하였기 때문에 그 크기가 증가함을 확인하였다.

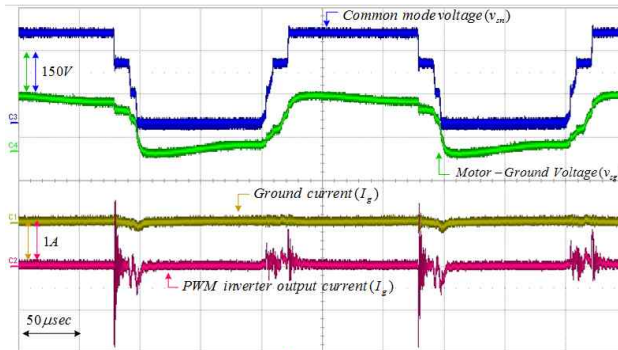


그림 7 일반 전력공급선에 Drain wire 적용한 경우 전압, 전류

5. 결론

본 논문에서는 전기추진체계에 적용된 전동기 구동시스템의 전도성 EMI 저감을 위해 누설전류 발생의 원인이 되는 Common mode 전압의 발생 원인에 대해 분석하였다. 전동기에서 발생한 누설전류가 선체를 통해 함정 전반에 흐를 경우 인접 장비 또는 시스템의 오작동을 유발할 수 있기 때문에 적절한 대책이 필요하다. 본 논문에서는 전동기의 전력 공급선에 Drain wire를 추가로 설치할 경우 선체로 흐르는 누설전류가 대폭 감소되는 효과를 확인하였다.

참고 문헌

- [1] D. Rendusara, "An Improved Inverter Output Filter Configuration Reduces Common and Differential Modes dvdt at the Motor Terminals in PWM Drive Systems", IEEE Transaction on Power Electronics Vol. 13, NO. 6, 1998, Nov.
- [2] G.L. Skibinski, "System Design of Adjustable Speed Drives Part 1, Equipment and Load Interactions", IEEE Industry Applications Magazine, 2012, Jul/Aug.