자이레이터를 이용한 자기유도 전력전달시스템의 일반적 해석

손영훈, 최보환, 조규형, 임춘택
한국과학기술원

Gyrator-Based Analyses of Resonant Circuits in Inductive Power Transfer Systems

Yeong H. Sohn, Bo H. Choi, Gyu-Hyeong Cho and Chun T. Rim
KAIST

ABSTRACT

본 논문에서는 자이레이터를 사용하여 자기유도 전력전달시스템의 보상 회로를 해석하는 방식을 제안한다. 보상회로를 주로 구성하는 갖가지 공진 회로와 유도 결합 코일이 자이레이터의 특성을 가지고 있음을 보인다. 그러므로, 자이레이터의 바람직한 특성들을 보상 회로의 전원-로드 이득, 전원의 역률 등을 해석하는데 사용할 수 있음을 보인다. 제안된 방식은 수식 기반이 아닌 회로 기반의 해석 방식이라 적용이 간편하고, 모든 주파수 영역에서도 해석이 가능하며, 코일의 직렬 기생 저항 또한 포함할 수 있다는 특징이 있다.

1. 서론

자기유도 전력전달시스템(IPTS)은 전기 자동차, 의료용 전자기기, 조명, 공정 자동화 등 다양한 분야에 사용되고 있다. IPTS을 구성하는 요소 중 보상 회로는 유도결합코일로 부터 발생하는 유효 전력을 보상하여 더 높은 전력을 전달하기 위해 필수적이다. 지금까지 연구 된 보상 회로는 전압원 구동 직렬-직렬(V-SS), 전류원 구동 직렬-병렬(I-SP), 전압원 구동 인덕터-커패시터-인덕터(V-LCL) 등 종류가 다양하다. 이러한 보상 회로들은 전원-로드 이득, 전원의 역률 등 여러 전기적 특성이 각기 다르다. 따라서 IPTS를 설계함에 있어서 요구 사항을 잘 고려해 적절한 보상회로를 선정하는 것은 매우 중요하다.

보상회로는 크게 전원, 유도결합코일, 일차측 및 이차측 보상 회로, 그리고 로드로 구성된다. 일차측 및 이차측 보상 회로는 기본적으로는 각각 한 개의 커패시터를 사용하고, 필요한 경우 인덕터를 포함한 여러 개의 에너지 저장성 소자로 이루어질 수 있다. 이렇듯 보상회로가 다수의 에너지 저장성 소자를 항상 포함하기 때문에 이 것의 수학적 분석은 상당히 복잡하다. 그러므로, 비록 대부분의 보상회로들이 이미 수학적으로 충분히 분석 돼 있음에도 불구하고 보상회로를 간단하고 통일적으로 해석하는 방식은 여전히 필요하다.

본 논문에서는 자이레이터를 사용하여 복잡한 보상회로의 해석을 간단하게 하는 방식을 제안한다. 보상회로를 구성하는 주요소인 유도결합코일과 공진 회로가 자이레이터의 특성을 가짐을 보인다. 이를 바탕으로 하여 보상회로를 자이레이터를 사용하여 모델링 할 수 있다. 그 후에 자이레이터의 몇몇 전기적 특성들을 사용하면 보상회로의 전원-로드 이득, 전원의 역률, 로드독립 출력 특성 유무, 개방/단락 로드 허용 여부 등 중요한 전기적 특성들을 간편하게 파악할 수 있다. 제안된 방식을 사용하여 잘 알려진 보상 회로 중 하나인 V-LCL을 예로서 해석하여 그 결과가 기존의 알려진 바와 일치함을 보인다.[1]

2. IPTS에 사용되는 자이레이터

2.1 자이레이터

자이레이터는 한 포트의 전압을 다른 포트의 전류로 바꾸는 선형 시불변 무손실 2-포트 회로로, 저항, 커패시터, 인덕터, 이상 트랜스포머와 함께 기본적인 선형 전기소자를 이룬다. 자이레이터의 회로 기호는 아래 그림 1과 같으며 그 것의 전압/전류 관계식은 식 (1)과 같다.

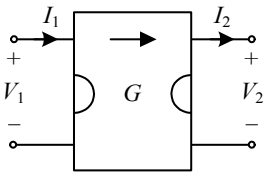

그림 2 자이레이터의 전기 회로 모델

$$I_2 = -G \times V_1 \quad (1a)$$

$$I_1 = -G^* \times V_2 \quad (1b)$$

2.2 에너지 저장성 소자를 사용한 자이레이터 구현

자이레이터를 에너지 저장성 소자를 사용하여 구현할 수 있다. 그 구현은 아래 그림 2와 같다.

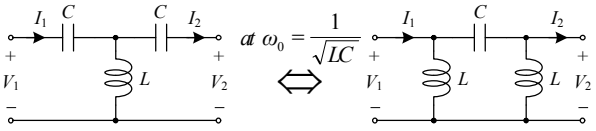

그림 3 에너지 저장성 소자를 사용한 자이레이터 구현

위 그림 2의 좌우 두 회로의 전압/전류(I_1, I_2, V_1, V_2) 관계는 아래 식 (2)로 주어지는 공진 주파수에서 서로 등가이다. 따라서 위 두 회로는 그 내부의 L과 C의 배치가 다름을 배제한 뒤 외부 포트의 전압/전류만을 놓고 보았을 땐 차이가 없다. 그 때, 위 회로의 전압/전류 관계식을 세우고 식 (1)과 비교 해 보면 이 것이 이득 G가 아래 식 (3)으로 주어지는 자이레이터임을 알 수 있다.

$$\omega_0 = 1/\sqrt{LC} \quad (2)$$

$$G = 1/(j\omega_0 L) \quad (3)$$

2.3 공진회로와 유도결합코일의 자이레이터 특성

보상회로의 주요 구성요소인 공진회로와 유도결합코일을 자이레이터를 사용하여 나타낼 수 있다. 공진회로는 직렬-병렬 공진회로와 병렬-직렬 공진회로로 나뉘는데, 아래 그림 3 및 4는 직렬-병렬 공진회로를 자이레이터를 사용하여 나타낸다. 병렬-직렬 공진회로를 자이레이터를 사용하여 나타내는 것은 이와 크게 다르지 않아 자세한 설명은 생략하였다. 그림 4의 경우, 소자의 직렬 기생 저항을 포함하며 주파수와 무관하게 성립하는 일반적인 등가 회로임에 주목해야 한다.

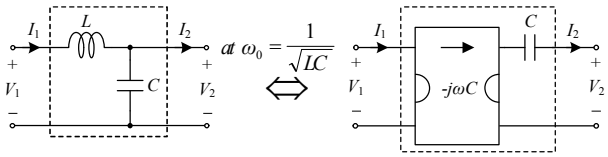

그림 4 공진 주파수에서만 성립하는 직렬-병렬 공진 회로의 자이레이터 모델

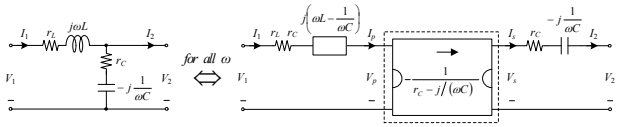

그림 5 주파수와 무관하게 성립하는 직렬-병렬 공진회로의 자이레이터 모델

유도결합코일의 경우, 그 것의 잘 알려진 등가 T-모델과 그림 2로 부터 주파수와 무관하게 성립하는 자이레이터 모델을 쉽게 얻을 수 있으며, 아래 그림 5와 같다.

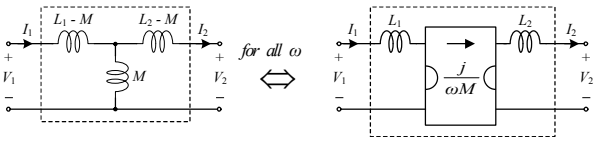

그림 6 주파수와 무관하게 성립하는 유도결합코일의 자이레이터 모델

2.4 자이레이터를 사용한 V-LCL-P의 해석

가장 널리 사용되는 보상회로 중 하나인 V-LCL-P를 자이레이터로 해석하는 것을 예로서 보인다. 그림 6는 V-LCL-P 회로를 나타내며, 이 것의 잘 알려진 바람직한 특성들을 얻기 위한 공진 조건은 아래 식 (4)와 같다.

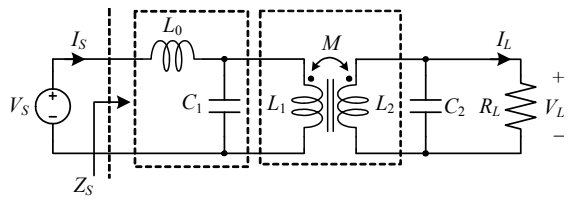

그림 7 V-LCL-P의 회로 모델

$$\omega_0 = 1/\sqrt{L_0C_1} = 1/\sqrt{L_1C_1} = 1/\sqrt{L_2C_2} \quad (4)$$

위 그림 6의 점선 박스 안의 직렬-병렬 공진 회로와 유도결합코일을 이를 2.3장의 내용을 바탕으로 자이레이터 모델로 바꾸고 간소화 과정을 거치면, 아래 그림 7과 같은 V-LCL-P의 등가 자이레이터 모델이 얻어진다. 이 모델은 식 (4)에 주어지는 공진 주파수에서만 성립하나, 그림 4 및 5를 참고하면 보상 소자의 직렬 기생 저항을 포함하며, 모든 주파수에서 성립하는 자이레이터 모델을 어렵지 않게 얻을 수 있다. 가격이 낮고 신뢰성이 높은 IPTS는 대부분 고정 주파수에서 동작하므로, 공진 주파수에서만 성립하는 V-LCL-P의 자이레이터 모델만 제시하였다.

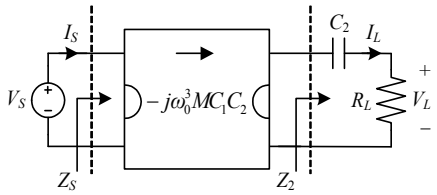

그림 8 공진 주파수에서만 성립하는 V-LCL-P의 등가 자이레이터 모델

그림 7에 나타낸 자이레이터 모델로부터 복잡했던 기존의 V-LCL-P 해석을 아래와 같이 간단히 할 수 있다.

1) 자이레이터의 일차측이 이상 전압원에 의해 구동되므로 이차측은 이상 전류원 특성을 가진다. 따라서 로드 전류 I_L은 로드 R_L에 독립이다.
2) 자이레이터는 이차측의 개방회로를 일차측에선 단락회로로 보이게 하므로, R_L이 개방이면 전압원 V_S에서 제한되지 않은 전류 I_S가 흐른다.
3) 전원-로드 이득 A_G은 자이레이터의 이득으로 부터 아래 식 (5)와 같이 주어진다.

$$A_G \equiv I_L / V_S = -j\omega_0^3 MC_1C_2 \quad (5)$$

4) 전원 V_S의 역률 PF_{Z_S}은 단순히 자이레이터 이차측의 역률 PF_{Z_2}이며, 아래 식 (6)과 같다.

$$PF_{Z_S} = PF_{Z_2} = R_L/\sqrt{R_L^2 + \{1/(\omega_0 C_2)\}^2} \quad (6)$$

3. 결론

IPTS의 보상 회로의 주된 요소인 공진 회로와 유도결합코일이 자이레이터의 특성을 가짐을 보였다. 이를 바탕으로 보상 회로를 자이레이터 모델로 등가적으로 표현할 수 있음을 보였다. 가장 널리 사용되는 보상회로 중 하나인 V-LCL-P를 자이레이터 모델로 표현하고 자이레이터의 특성을 사용하여 간편하게 해석할 수 있음을 하나의 예로서 보였다.

This work was supported by the Technology Innovation Program (10052912, Development of Induction/magnetic resonance type 6.6kW, 90% EV Wireless Charger) funded By the Ministry of Trade, industry & Energy(MI, Korea)

참 고 문 헌

[1] C. S. Wang, G. A. Covic, and O. H. Stielau, “Investigating an LCL Load Resonant Inverter for Inductive Power Transfer Applications”, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 19, No. 4, pp. 995-1002, 2004, July.