

DUT 및 PHIL 시뮬레이터 스위칭 주파수 비에 따른 PHIL 시뮬레이터 운전 특성

허홍준*, 황선웅*, 정동영*, 김장목*

*부산대학교 전기공학과

Operation Characteristics of PHIL Simulator depending on DUT and PHIL Simulator Switching Frequency Ratio

Hong-Jun Heo* Seon-Woong Hwang*, Dong-Yeong Jeong* and Jang-Mok Kim*

*Pusan National University

ABSTRACT

본 논문에서는 DUT(Device Under Test) 및 PHIL(Power Hardware-in-the-Loop) 시뮬레이터의 스위칭 주파수 비 및 PWM 위상차에 의하여 발생할 수 있는 문제를 분석하였다. 또한, DUT 인버터의 PWM 특성을 고려한 디지털 필터를 적용하여 PHIL 시뮬레이터의 운전 영역을 확대하였다. 디지털 필터는 DUT 스위칭 주파수의 고조파 성분만을 선택적으로 제거하여 PHIL 스위칭 주파수에 무관하게 일정한 시뮬레이션 결과를 생성할 수 있다. 분석한 내용과 디지털 필터의 변경으로 인한 PHIL 시뮬레이터의 특성은 다양한 조건에서 시행된 실험을 통하여 검증하였다.

1. 서론

환경규제 및 시스템 효율 개선을 위하여 산업 분야에서의 전동화는 계속해서 이루어지고 있다. 특히, 자동차 산업을 필두로 한 운송 산업에서 전동기 제어 시스템의 고장은 사용자의 생명과 직결되기 때문에 제어 시스템의 안정성 향상이 중요시되고 있다. 이러한 제어 시스템의 안정성 향상을 위하여 HIL(Hardware-in-the-Loop)와 같은 시뮬레이션 기술이 이용

된다.^[1]

HIL 시뮬레이션 중 PHIL(Power HIL) 시뮬레이션의 DUT(Device Under Test)는 그림 1과 같이 제어 소프트웨어 및 전력 소자를 포함하고 있다. 그래서, 이를 시뮬레이션하기 위한 PHIL 시뮬레이터의 하드웨어는 모델링 결과를 실제 전압 또는 전류로 생성하기 위한 전력 증폭기(Power Amplifier)와 DUT의 전력 소자 및 PHIL 시뮬레이터의 전력 증폭기 스위칭 동작으로 인한 고조파 전류를 저감하기 위한 인터페이스 필터(Interface Filter)로 구성된다. 이를 이용하면 DUT의 제어 알고리즘뿐만 아니라 전력 소자까지 PHIL 시뮬레이터와의 전력 교환을 통해 시험할 수 있다.

DUT의 하드웨어와 PHIL 시뮬레이터의 소프트웨어를 연계하는 방식을 인터페이스 알고리즘(Interface Algorithm)이라고 한다. 인터페이스 알고리즘은 PHIL 시뮬레이터의 입출력을 결정하고, 안전성 및 시뮬레이션 정밀성에 영향을 미치는 주요 요소로 많은 연구가 진행되었다. 대표적인 인터페이스 알고리즘으로는 그림 1과 같은 형태의 VT-ITM(Voltage-Type Ideal Transformer Model)이다. VT-ITM 이상적으로 전류를 입력받으며, 입력된 전류에 기반한 전기적 모델에 따라 출력 전압이 결정된다. 전기적 모델에 의하여 결정된 출력 전압은 이상적인 전력 증폭기를 이용하여 인터페이스 필터에 인가된다.

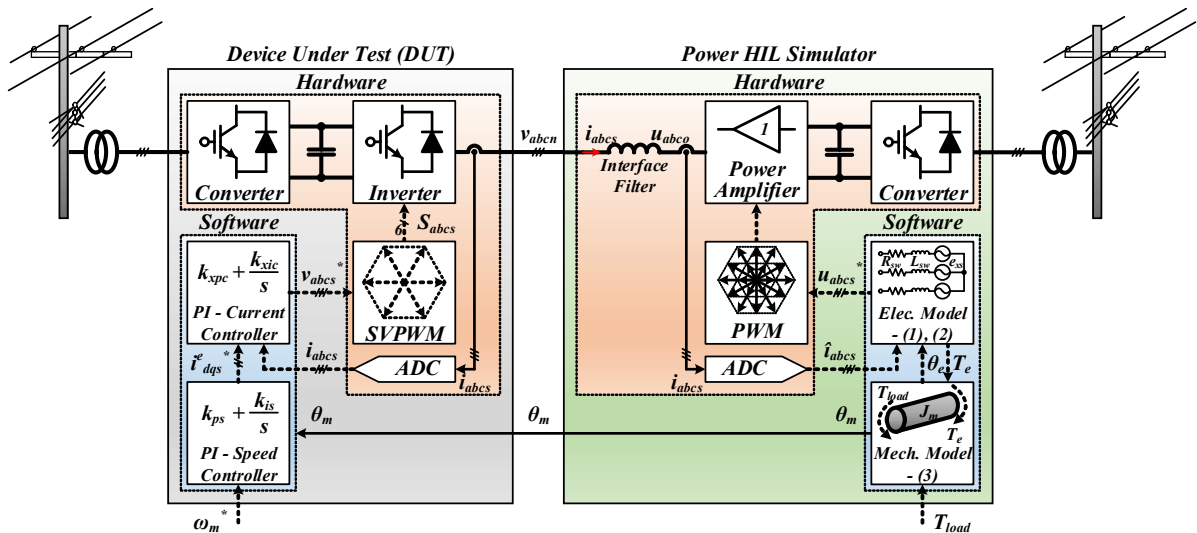


그림 1 DUT를 포함한 전동기 제어 시뮬레이션을 위한 PHIL 시뮬레이터 제어 블록도
Fig. 1 PHIL simulator control block diagram for motor control simulation including DUT

FCF(Feed-back Current Filtering)는 기존 VT-ITM의 전류 입력에 저역 통과 필터(Low Pass Filter)를 추가한 형태이다. FCF는 VT-ITM에 사용되는 전기적 모델의 고조파 성분에 의한 출력 외란을 줄임으로써 VT-ITM이 운전 불가한 시뮬레이션 조건에서도 운전할 수 있다.

하지만, 전동기 시뮬레이션을 위한 PHIL 시뮬레이터는 기존의 DUT와 달리 제어기와 전력 소자를 가지고 있어 샘플링 및 스위칭 동작을 한다. PHIL 시뮬레이터 또한 전류를 측정하고 전압을 출력하기 위해서는 샘플링 및 스위칭 동작이 필요하다. 이 두 제어기의 샘플링 시점 및 PWM 주파수에 따라 시뮬레이션 결과에 영향을 줄 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 DUT와 PHIL 시뮬레이터의 스위칭 주파수 비율 및 PWM 위상차에 의하여 발생가능한 문제점을 분석하였다. 또한, DUT의 일정한 스위칭 주파수를 가지는 특성을 이용하여 기존 LPF가 아닌 MAF(Moving Average Filter)에 기반한 개선된 형태의 인터페이스 알고리즘을 적용하였다. 적용한 필터는 특정 주파수의 고조파 성분을 제거할 수 있어 PHIL 시뮬레이터의 운전 영역을 확대할 수 있다.

2. 전동기 시뮬레이션을 위한 PHIL 시뮬레이터

2.1 전기 및 기계 모델

그림 1에서 PHIL 시뮬레이터가 전동기의 전기적 모델을 나타내기 위해서는 전동기 역기전력 성분을 출력해야 한다. 하지만, 역기전력 성분만을 PHIL 시뮬레이터가 출력할 경우, DUT에서 출력하는 전류는 인터페이스 필터의 임피던스에 의존할 수밖에 없으며, 인터페이스 필터의 임피던스와 시뮬레이션하려는 전동기의 고정자 임피던스가 다르면 출력하는 전류 역시 시뮬레이션하려는 전동기에 발생하는 전류와 상이하게 된다. 그래서, 전동기 고정자 임피던스의 특성을 시뮬레이션하기 위해서는 식 (1)과 같이 역기전력 성분 및 두 임피던스 차를 보상할 수 있는 전압을 PHIL 시뮬레이터가 출력하여야 한다.

$$\begin{aligned} u_{ds}^e &= R_{sw} \hat{i}_{ds}^e + sL_{dsw} \hat{i}_{ds}^e - \omega_c L_{qsw} \hat{i}_{qs}^e \\ u_{qs}^e &= R_{sw} \hat{i}_{qs}^e + sL_{qsw} \hat{i}_{qs}^e + \omega_c L_{dsw} \hat{i}_{ds}^e + \omega_c \lambda_f \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, $u_{x_s}^e$ 및 $\hat{i}_{x_s}^e$ 는 각각 PHIL 시뮬레이터의 x 축 동기 좌표계 출력 전압과 측정 전류이다. R_{sw} 및 L_{xsw} 는 각각 전동기 고정자 저항 및 인덕턴스에서 인터페이스 필터 저항 및 인덕턴스를 뺀 값이다. 또한, ω_c 는 전기적 각속도, λ_f 는 회전자 자속에 의한 고정자 쇄교 자속이다.

전동기에서 생성된 전기적 토크 T_e 는 식 (2), 기계적 모델은 식 (3)과 같이 모델링 할 수 있다.

$$T_e = \frac{P}{2} \frac{3}{2} [\lambda_f \hat{i}_{qs}^e + (L_{ds} - L_{qs}) \hat{i}_{ds}^e \hat{i}_{qs}^e] \quad (2)$$

$$\omega_m = \frac{T_e - T_{load}}{sJ_m + B_m} \quad (3)$$

여기서, P , J_m 및 B_m 은 각각 전동기 극수, 관성모멘트 및 마찰계수를 의미하며, ω_m 및 T_{load} 는 각각 기계적 각속도 및 부하 토크를 의미한다.

2.2 스위칭 비에 따른 측정 전류

PHIL 시뮬레이션 결과 앞의 수식과 같이 PHIL 시뮬레이터에서 측정된 전류에 기반을 둔다. DUT와 PHIL 시뮬레이터에서 각각 측정된 전류가 같을수록 일정한 시뮬레이션 결과를 낼 수 있다. 하지만, DUT와 PHIL 시뮬레이터의 제어기는 각각의 발전기를 사용하므로 두 시스템을 동기화시키는 것은 새로운 문제이며, 일반적인 상황에서 두 시스템은 시간에 따라 전류 샘플링 및 PWM 시작의 상대적인 시점이 계속해서 변화하게 된다.

샘플링 및 PWM 시작의 상대적인 시점 변화의 영향은 DUT와 PHIL 시뮬레이터의 스위칭 주파수의 비에 따라 변화하게 된다. 본 논문에서는 인터페이스 필터로 L 필터를 사용하였으며, 전력 증폭기로는 3-레벨 NPC를 사용하였다. 그림 2는 이러한 조건에서 DUT와 PHIL 시뮬레이터의 스위칭 주파수가 같을 때 PWM 위상차에 따른 측정 전류를 나타낸 것이다. 인터페이스 필터에 인가되는 전류는 두 전압의 차이에 의하여 발생한다. 그래서, 두 전압의 차이가 작은 $V_{dc,DUT}/2$ 와 $V_{dc,PHIL}/2$ 를 출력할 때 전류의 변화가 가장 작다. 특히, DUT와 PHIL 시뮬레이터의 직류단 전압이 같으면, 이때의 전류 변화는 0이다.

T_d 만큼 두 PWM 사이의 시간 지연이 있다고 하면, 시간 지연과 PHIL 시뮬레이터의 양의 전압 인가 시간 $T_{on,PHIL}$ 의 크기에 따라 PHIL 시뮬레이터의 측정 전류가 달라진다. 이를 수식적으로 나타내면 다음 식 (4)와 같다.

$$\hat{i}_{x_s} = \begin{cases} i_{x_s} & \text{when } T_d \leq T_{on,PHIL} \\ i_{x_s} + \frac{V_{dc,DUT} - V_{dc,PHIL}}{2L_{x_s}} \left(T_d - \frac{T_{on,PHIL}}{2} \right) & \text{when } T_d > T_{on,PHIL} \end{cases} \quad (4)$$

PHIL 시뮬레이터의 스위칭 주파수가 DUT와 같을 때는 두 PWM의 위상차 T_d 는 측정된 전류의 크기에 영향을 미친다. T_d 가 증가함에 따라 DUT에서 측정된 전류보다 PHIL에서 측정된 전류가 더 크게 발생하며, 이는 시뮬레이션에 외란으로 작용하여 일정한 시뮬레이션 결과를 얻을 수 없다.

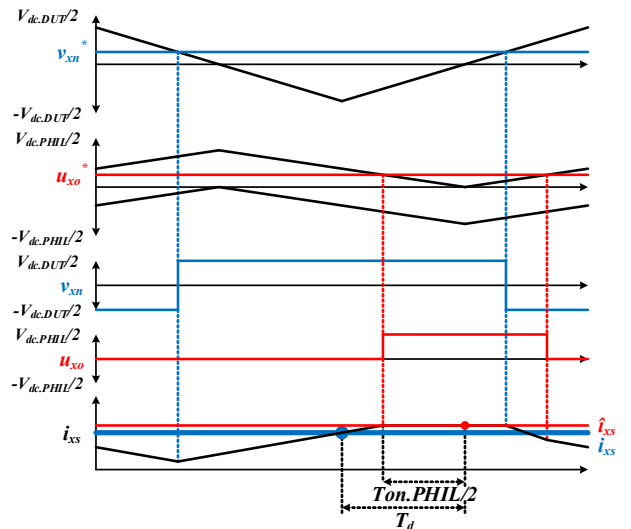


그림 2 샘플링 및 PWM 위상차에 따른 PHIL 측정 전류
Fig. 2 Measurement current according to sampling and PWM phase difference

PHIL 시뮬레이터의 스위칭 주파수가 DUT의 2배인 경우, T_d 는 측정된 전류의 크기 및 고조파 전류의 크기에도 영향을 미친다. 4배인 경우에는 T_d 에 의한 전류 크기의 영향은 적지만, T_d 에 따라 측정된 전류의 고조파 성분의 크기는 변화한다. 그래서, 전동기 제어 시뮬레이션을 위한 PHIL 시뮬레이터에 기존 인터페이스 알고리즘을 적용할 경우, DUT 스위칭 주파수 대비 전력 증폭기의 스위칭 주파수가 최소 8배 이상이어야 일정한 시뮬레이션 결과를 획득할 수 있다. 이를 해소하기 위해서는 기존 인터페이스 알고리즘의 개선이 필요하다.

3. 제안된 MAF를 사용한 FCF

전력 증폭기 스위칭 주파수가 DUT의 4배일 때, 측정된 전류의 고조파 성분 변화에 따라 시뮬레이션 결과가 변화하는 것은 LPF에 의하여 고조파 성분이 완전히 제거되지 않기 때문이다.

그림 3은 전동기 제어에서 주로 발생하는 동기 좌표계 전류 성분을 나타낸 것이다. 동기 좌표계에서 전동기 전류는 크게 직류, 전동기 운전주파수 및 DUT 스위칭 주파수 성분으로 나눌 수 있다. 이중 문제가 되는 DUT 스위칭 주파수의 고조파 성분을 제거하기 위해서는 DUT 스위칭 주기에 대하여 적분 평균을 취하면 된다. DUT 스위칭 주기에 대한 적분 평균 결과는 직류 성분은 입력과 동일하게 나타나며, 전동기 운전주파수 성분은 지연이 발생하게 된다. 하지만, 전동기 운전주파수가 DUT 스위칭 주파수에 비하여 작다고 가정하면 지연 성분은 무시할 수 있다. 적분 평균을 디지털 제어기 형태로 나타내면 식 (5)와 같이 MAF(Moving Average Filter)형태로 나타난다.

$$\hat{i}_{xs}^e[k] = \frac{\hat{i}_{xs}^e[k] + \hat{i}_{xs}^e[k-1] + \dots + \hat{i}_{xs}^e[k-N-1]}{N} \quad (5)$$

여기서, N은 전력 증폭기 스위칭 주파수와 DUT 스위칭 주파수의 비를 의미한다.

FCF 방법에 기존 LPF 대신 MAF를 사용하면, 문제가 되는

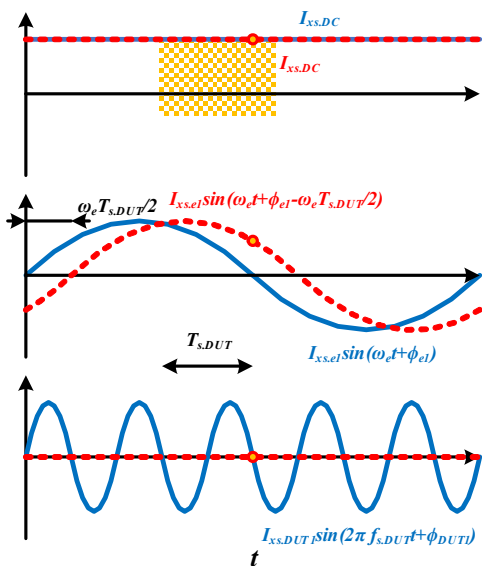


그림 3 동기 좌표계에서 전류 성분 및 적분 평균
Fig. 3 Current components and integral mean

DUT 스위칭 주파수의 고조파 성분의 영향을 제거할 수 있어서 전력 증폭기의 스위칭 주파수가 DUT 스위칭 주파수의 4배인 경우에도 일정한 결과를 얻을 수 있어 PHIL 시뮬레이터의 운전 영역을 증가시킬 수 있다.

3. 실험

그림 4는 기존 LPF를 사용한 FCF 인터페이스 알고리즘이며, 그림 5는 본 논문에서 제안한 MAF를 사용한 결과이다. 기존 LPF를 사용한 경우 PHIL 시뮬레이터 출력 전압에 고조파 성분을 포함되며, 전류에도 1차 고조파 성분이 299[mA]가 발생한다. 반면, MAF를 사용한 경우 PHIL 시뮬레이터 출력 전압에 고조파 성분이 없으며, 전류의 1차 고조파 성분은 165[mA] 줄어든 것을 볼 수 있다.

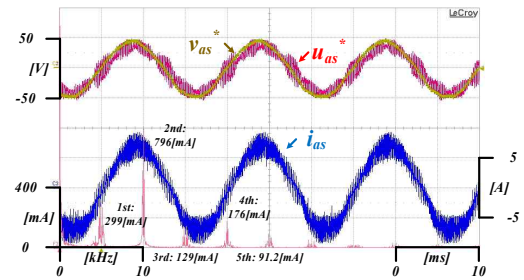


그림 4 LPF를 사용한 FCF 시뮬레이션 결과
Fig. 4 Simulation result of FCF using LPF

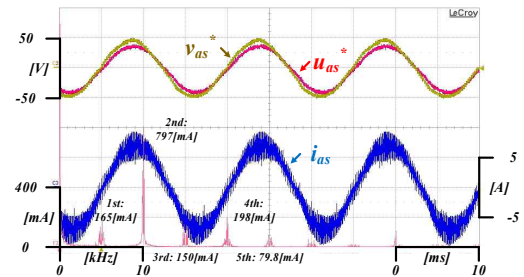


그림 5 MAF를 사용한 FCF 시뮬레이션 결과
Fig. 5 Simulation result of FCF using MAF

3. 결론

본 논문에서는 PHIL 시뮬레이터와 DUT의 스위칭 주파수 비 및 위상차에 따른 문제를 분석하였다. 또한, 이로 인한 문제를 일부 해결하기 위하여 MAF를 적용한 인터페이스 알고리즘을 제안하였다. MAF는 DUT의 스위칭 주파수 고조파 성분의 전류를 제거하여 PHIL 시뮬레이터의 출력에 고조파 성분을 제거할 수 있었으며, 이로 인하여 인터페이스 필터에 흐르는 고조파 성분의 전류를 감소시킬 수 있었다. 또한, PWM 위상차로 인한 문제 또한 해결 가능하다.

참고 문헌

- [1] 오형록, 장해근, 한 대수, "Power Hardware-In-the-Loop-Simulation(P-HILS) 개념과 활용사례", 전력전자학회지, 제 23권, 제6호, pp. 51-27, 2018, Dec.