고주파 대전류 PWM 제어 인버터의 정밀 전력측정에 필요한 주파수 대역과 위상 특성

탄소 중립 사회를 위해 전기자동차(xEV) 연구 개발에서는 구동 모터를 제어하는 인버터의 고효율화가 요구되어 지고 있으며 이에 따라 인버터 효율의 정밀 측정은 필수 요소가 되었습니다. 대용량 인버터에서는 PWM 변조 성분이나 대전류를 측정해야 하는데 특히 대전류를 측정할 때에는 전류 센서의 플랫한 주파수 측정 대역을 확보해야 하며 동시에 전류 센서의 위상 보정도 해야 합니다. 본 레포트에서는 인버터 고주파 대전류 측정 시 유의해야 할 점에 대해 정리하였습니다.

1. 서론

지속 가능한 사회 실현의 한 방안으로 탄소 중립 사회를 만들기 위해 자동차나 수송 기기의 전동화가 가속화되고 있으며 특히 xEV의 개발이 국내외에서 활발해지고 있습니다. 특히 파워 트레인의 전동용 모터와 인버터의 경우 고성능화, 고효율화가 요구되어 지고 있어 정확하고 정밀한 전력측정은 필수적인 상황입니다.

직류 전력을 3상 전력으로 변환하는 인버터의 전력측정에서는 PWM 변조에 의한 주파수 성분의 고주파화, 그로 인한 노이지의 영향 그리고 전류 센서의 오차 등을 고려해야 합니다. 따라서 전력 측정에 필요한 측정 주파수 대역을 확보하고 위상 보정 및 전용 액세서리를 사용하면 보다 정밀한 전력 측정을 할 수 있습니다.

PWM 제어 인버터의 정밀한 전력 측정을 위해서는 아래 3가지의 요소를 고려해야 합니다.

- 왜형파 전압, 전류에 의한 광대역에 이르는 유효 전력의 특징
- PWM 제어 인버터에서 전력 측정에 필요한 주파수 대역
- 전류 센서의 위상 오차 영향과 보정

전류 센서를 이용한 전력 측정의 예로 YOKOGAWA 파워 아날라이저 WT5000과 전류 센서 모듈 760903, 전류센서(CT시리즈)(사진 1)를 사용했을 때의 위상특성과 보정 효과에 대해 소개하도록 하겠습니다.

2. 교류 전력의 기본

PWM 제어 인버터의 전력 측정에 필요한 주파수 대역을 고려할 때 광대역에 이르는 유효 전력의 특징을 이해하는 것은 중요합니다. 전압과 전류가 직류인 경우 또는 전압과 전류의 위상차가 동상인 정현파의 경우 유효 전력은 전압 실효값과 전류 실효값의 곱입니다. 하지만 전압과 전류의 위상차가 발생하면 유효 전력은 전압 실효값과 전류 실효값과 역률의 곱이 됩니다. 역률은 cosφ이고 φ는 전압-전류 간의 위상차입니다. 전압과 전류가 고조파 성분을 포함한 왜형파라면 전력 P는 순시전압$u(t)$와 순시전류 $i(t)$를 곱한 순시전력의 시간 평균값으로 (1) 식과 같습니다.

사진1 WT5000 (위), 760903과 CT1000A 연결 예 (아래)

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T u(t) \times i(t)\, dt$$

$$= \frac{1}{T}\int_0^T \{U_{R0} + \sum_{k=1}^{\infty} \sqrt{2} U_{Rk} \cos(k\omega t - \varphi_{uk})\}$$

$$\times \{I_{R0} + \sum_{k=1}^{\infty} \sqrt{2} I_{Rk} \cos(k\omega t - \varphi_{ik})\}\, dt$$

$$= \frac{1}{T}\int_0^T \{U_{R0} \times I_{R0} + U_{R0} \times \sqrt{2} I_{R1} \cos(\omega t - \varphi_{i1}) + \cdots$$

$$2 \times U_{Rk} \cos(k\omega t - \varphi_{uk}) \times I_{Rk} \cos(k\omega t - \varphi_{ik}) + \cdots\} dt$$

$$= U_{R0} I_{R0} + \sum_{k=1}^{\infty} U_{Rk} I_{Rk} \cos(\varphi_{ik} - \varphi_{uk})$$

...(1)

T: 주기, U_{R0} : 전압의 직류 성분, I_{R0} : 전류의 직류 성분
k: 고조파 차수, U_{Rk} : k차 성분의 전압 실효값,
I_{Rk} : k차 성분의 전류 실효값,
φ_{uk} : k차 성분의 전압 위상각 φ_{ik} : k차 성분의 전류 위상각

위 식에서 왜형파의 전압과 전류에 의해서 광대역에 이르는 유효전력(왜형파의 유효전력)은 직류 전력과 동일한 주파수의 전압 실효값 × 전류 실효값 × 역률과의 총합으로 나타내고 있습니다. 여기서 주목해야 할 점은 주파수가 다른 전압과 전류의 곱의 항은 주기로 적분했을 때 제로가 된다는 점입니다. 이것은 전력 측정에 필요한 주파수 대역은 전압과 전류의 필요 대역 중 낮은 대역에 의존한다는 것을 의미합니다.

3. PWM 제어 인버터에서 모터에 인가되는 전력의 주파수 성분

많은 모터 제어 시스템에서 사용되는 3상 PWM 제어 인버터는 직류 입력을 3상 교류 출력으로 전력 변환하여 부하 모터를 제어하고 있습니다. 출력 전력은 모터 회전 주파수와 관련하여 기본 주파수 대역과 PWM 변조를 위한 캐리어 주파수 대역 두가지의 성분을 가지고 있습니다.

기본 주파수는 구동 모터의 극수와 회전수에 따라 결정됩니다. 예를 들어 극수가 8이고 회전수가 1500rpm이라면 기본 주파수는 100Hz가 됩니다. 캐리어 주파수는 기본 주파수보다 높은 주파수로 설정되며 PWM 원리에 따라 부하 모터를 제어합니다.

인버터에서 출력되는 전류와 전력의 캐리어 주파수 성분은 부하 모터를 구성하는 파라미터에 따라 크게 달라집니다. 모터 단자 ~ 중성점 간 인덕턴스 Lm이 작으면 높은 주파수 대역의 전류가 흐르기 쉬워 기본 주파수 이외의 전력 성분이 비교적 커지게 됩니다. 반대로 Lm이 크면 높은 주파수 전류 성분이 흐르기 어려워 전력은 기본 주파수 성분으로 거의 이루어질 것입니다.

3상 PWM 제어 인버터와 모터를 모사한 RL 부하 회로가 그림 1입니다. 기본파 100Hz, 캐리어 주파수 10kHz, 인버터 입력 100Vdc, 부하 모터 저항 1Ω, 인덕턴스 1mH, 각 상의 회로 조건은 동일하다고 가정하고 R상의 전력 주파수 성분에 대해 분석하였습니다.

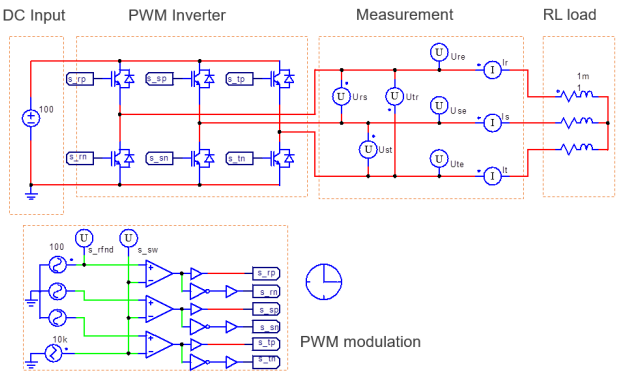

그림1. 3상 PWM 제어 인버터와 RL부하 회로

전압 파형과 전류파형의 FFT분석 데이터를 가지고 주파수별로 유효 전력값을 산출해 보았습니다. 기본 주파수의 유효전력을 100%로 했을 때 주파수 대역과 유효 전력과의 관계는 그림 2와 같습니다.

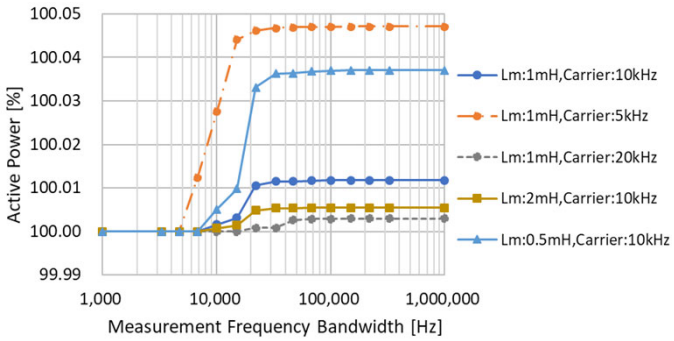

그림2 기본 주파수의 유효전력을 100%로 했을 때 주파수 대역과 유효 전력과의 관계
(인덕턴스0.5~2mH, 캐리어 주파수5~20kHz)

모터의 인덕턴스나 인버터의 캐리어 주파수를 변경했을 때 두 경우 모두 측정 주파수가 높아질수록 유효전력의 증가가 포화되어 있는 것을 보면 유효전력은 기본파 성분과 캐리어 주파수의 수 배 정도의 성분으로만 이루어져 있다는 것 을 알 수 있습니다. 또한 부하 모터의 인덕턴스 성분이 크거나 캐리어 주파수가 높을 경우 유효전력이 포화되기까지의 증가분이 더 작은 것을 보면 인덕턴스 성분에 의해 고주파 대역의 전류가 억제되고 있음을 시뮬레이션 결과를 통해서 확인할 수 있습니다.

다음으로 대전류 측정에 필수적인 전류센서의 위상특성이 유효전력에 어떠한 영향을 주는지 알아보도록 하겠습니다. 전류센서의 전파지연(伝搬遅延)특성이 주파수에 따라 위상특성으로 나타나서 전력 측정 시 전압-전류의 위상 오차 요소가 됩니다. 전류 센서의 전파지연 dly [s] 와 주파수 f [Hz]에 따른 유효전력 $P(f)$ [W]의 관계는 식(2)와 같습니다. 이 식을 기준으로 그림 2의 전력 산출 값에 전파지연 1000ns를 추가 했을 때의 결과를 그림 3에 나타냈습니다.

$$P(f) = S(f) \times \cos\{\varphi(f) + \Delta\varphi\}$$
$$= S(f) \times \cos\{\varphi(f) + (dly) \times f \times 360\}$$

... (2)

$S(f)$: 주파수 f 에 따른 피상전력 [VA],
$\varphi(f)$:주파수 f 에 따른 측정 대상의 전압-전류 위상차 [°],
$\Delta\varphi$: 전류 센서의 위상오차 [°]

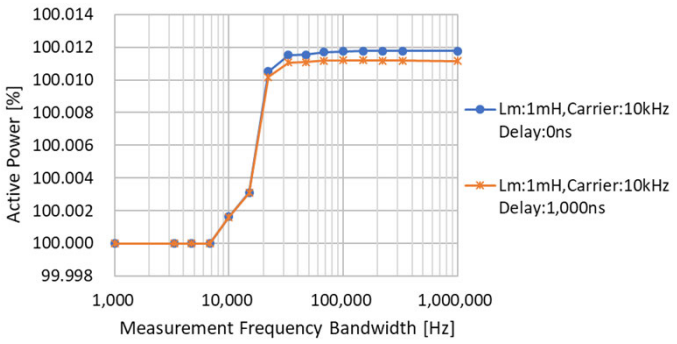

그림3 기본 주파수의 유효전력을 100%로 했을 때 주파수 대역과 유효 전력과의 관계
(전파지연에 따른 위상 오차의 영향)

이 결과에서 전파 지연이 없는 경우를 참값이라고 하면 캐리어 주파수의 2배 이상부터는 전파지연에 따라 오차가 발생하고 있으며 그 오차는 거의 일정하게 나타나고 있는 것을 알 수 있습니다. 이것은 높은 주파수 대역에서는 인덕턴스가 지배적인 제로 역률 전력 상태임과 동시에 고주파 대역의 피상 전력도 작아져서 유효 전력에 대한 위상 오차의 영향이 작아진 것이라고 생각 할 수 있습니다. 전류 센서를 포함한 전압-전류의 위상차 특성 관점에서도 인버터 전력 측정에서는 유도성 부하에 의해 전력 측정에 필요한 대역이 제한되는 것을 알 수 있 습니다.

4. 파워미터와 전류 센서에 필요한 보정 기능

대용량 인버터의 전력 측정에서 전류 센서는 필수 불가결한 요소이며 측정 정밀도는 전류 센서에 크게 의존합니다. 따라서 파워미터는 전류 센서의 특성을 보정하는 기능이 필요합니다. 전류 신호의 게인이나 옵셋 보정은 지금까지도 이루어져 왔고 캐리어 주파수의 고주파화에 따른 위상 보정도 요구되고 있습니다.

게인과 옵셋을 보정함으로써 정확한 전류값과 전력값을 측정할 수 있습니다. 게인 보정은 전류 센서의 교정값을 바탕으로 보정값을 얻을 수 있으며 옵셋 보정은 전류 센서를 파워미터에 연결한 상태에서 무부하 상태의 측정값을 취소(제로로 설정)하는 것으로 불필요한 잔류 옵셋 값을 보정한 측정이 가능합니다.

또한 위상 특성을 보정하는 것도 측정 정밀도를 향상시키기 위해 고려해야 할 방법 중의 하나입니다. WT5000에서는 전류 센서의 위상 오차에 의해 발생하는 전압과 전류의 위상오차를 보정하는 기능이 있습니다.

WT5000과 전류 센서 모듈 760903, 전류 센서(CT시리즈)를 사용했을 때의 전류 센서의 전파지연을 표1에서 보여줍니다.

표1. 전류센서(CT시리즈)의 전파지연

전류센서	CT60	CT200	CT1000	CT1000A	CT2000A
전파지연 (Typical) [ns]	70	70	110	10	40

전파지연의 부호는 지연인 경우 +(플러스)
전류센서 모듈 760903의CT preset 설정
전용 케이블761954/761955/761956 사용

WT5000에서는 전류 센서의 전파지연 시간을 보정하는 기능으로서 특정 주파수에서의 위상 오차값(보정값)을 입력하는 방법을 사용하고 있습니다. 표2는 유도성 부하에 있어 측정 대역이 제한되는 인버터의 전력값을 상정하여 각 CT 모델별로 주파수 위상특성을 변하지 않게 하는 주파수의 대표적인 위상 보정값을 보여줍니다.

표2. 전파지연에 따른 주파수와 위상오차(보정값)

전류 센서	CT60	CT200	CT1000	CT1000A	CT2000A
주파수[kHz]	10	10	5	5	10
위상오차 [°]	−0.252	−0.252	−0.198	−0.018	−0.144

위상오차의 부호는 위상 지연이 −(마이너스)

표 2의 값으로 보정했을 때의 위상 특성을 그림 4, 5, 6, 7에서 보여줍니다.

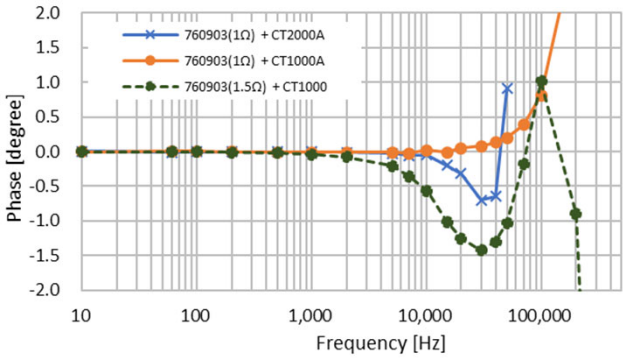

그림4 전류 센서 사용 시 전류 위상 주파수 특성 보정 전1

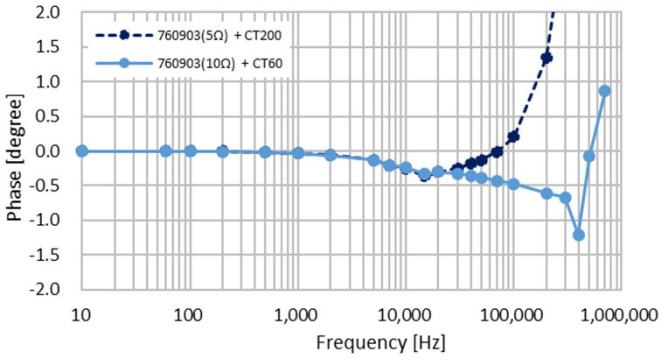

그림5 전류 센서 사용 시 전류 위상 주파수 특성 보정 전2

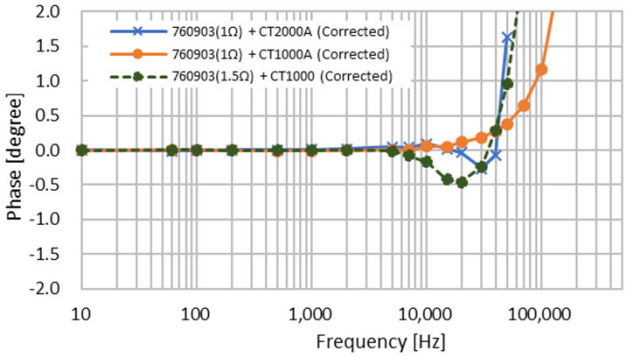

그림6　전류 센서 사용 시 전류 위상 주파수 특성 보정 후1

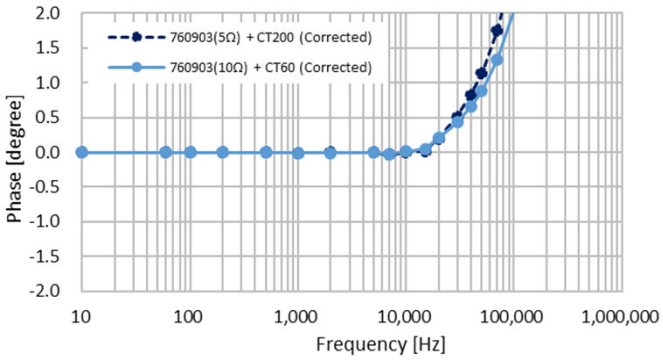

그림7　전류 센서 사용 시 전류 위상 주파수 특성 보정 후2

5.　PWM 제어 인버터의 출력 전력과 전류 센서의 위상 보정 효과

실제 3상 PWM 제어 인버터의 전력변환 효율 측정에서 인버터 출력을 전류센서(CT1000A와CT200)로 측정했을 때의 결과가 그림 8입니다. CT1000A는 전파 지연이 작기 때문에 위상 보정 전후에서 가까운 값이 측정될 수 있을 것으로 생각되어 지지만 CT200에서는 위상 보정 후 값이 CT1000A 값에 가까워 전파 지연이 큰 전류 센서일수록 위상 보정 효과가 클 것으로 생각됩니다.

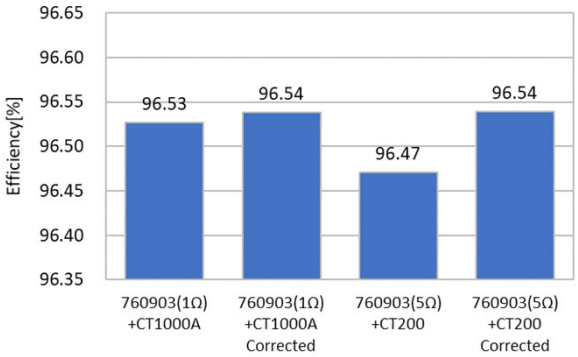

그림 8.전력 변환 효율의 측정 결과

6. 결론

유도성 부하를 제어하는 xEV용 모터･인버터 개발에서 요구되는 정밀한 유효 전력 측정에는 대체로 캐리어 주파수의 수배 정도의 측정 대역과 전파 지연이 작은 전류 센서가 필요하다는 것을 알게 되었습니다. 이러한 요구에 부응해 YOKOGAWA WT5000에서는 위상 보정 기능이 탑재되어 있으며 전류센서 모듈 760903과 전류 센서(CT 시리즈)를 사용하면 한층 더 고정밀도로 전력 측정이 가능하다는 것을 소개하였습니다.

PWM 제어 인버터는 지속 가능한 사회의 실현 방안 중 하나인 탄소 중립 사회를 위해 필수적인 전력변환 기술로 여겨집니다. 고정밀 전력 측정과 분석을 통해 향후에도 측정과 제어, 정보를 주제로 보다 풍요로운 인간 사회의 실현을 위해 공헌하도록 하겠습니다.

■한국요꼬가와전기 계측영업본부
경기도 성남시 분당구 판교로 253 판교이노밸리 B동 703호
계측영업본부 TEL : 02-2628-3813

■대전 사무소
세종특별시 가름로 232 세종비즈니스센터 A동 401호
TEL:044-867-9802

■대구 사무소
대구광역시 동구 동부로 30길 100-5
TEL:053-744-4678

■부산 사무소
부상광역시 중구 광복로 97번길 20 HBC효천사옥 604호
TEL:051-326-0661

기재 내용은 2021년 7월 1일까지의 내용이며 예고 없이 변경될 수 있는 점 양해 부탁 드립니다.
All Rights Reserved. Copyright © 2021, Yokogawa Test & Measurement Corporation [Ed:01/d]