

소개 Introduction

전력 시스템을 분석하거나 3상 PWM 컨버터의 계통 연계 시, Per-unit system 기반으로 물리량을 비교하는 것은 유용한 정보를 줄 수 있다. 용량이 다른 컨버터라도, Per-unit system으로 동일한 물리량을 가진 시스템은 같은 제어 결과를 보여 준다. 본 문서에서는 Per-unit system에서 기저값 계산 방법과 그 기반으로 물리량을 비교하는 이점에 대해서 소개한다.

Per-unit system

전력 시스템 분석에 있어서 per-unit system은, 해당 시스템의 물리량을 기저값(base value)의 비율로 표현할 때 사용한다. 해당 물리량의 상대적인 값은 변압기 전후로 변하지 않기 때문에 시스템 비교 시 유용하다.

기저값(base value)은 전력(Power)과 전압(Voltage)을 기준으로 계산한다. PCS (power conditioning system) 연결 시 기저값 계산은 다음과 같이 진행한다. 먼저 시스템의 정격 전력과 정격 전압, 정격 주파수를 정의한다.

$$P_{base} = \text{Rated power} \quad [W]$$

$$V_{base} = \text{Rated phase voltage} \quad [V_{rms}]$$

$$f_{base} = \text{Rated frequency} \quad [Hz]$$

정격 전력의 경우, 원래 피상전력(apparent power)을 기준으로 단위로써 [VA]를 사용하는 것이 맞으나, 통상 계통 연계형 PWM 컨버터의 경우 역률 1 운전을 하고, 최대 전력 용량 역시 해당 운전을 가정하므로 [W]로 계산하여도 무방하다. 다만, 무효전력이 상시 공급되어 실제 전류가 크다면 피상전력을 기준으로 해야 한다.

정격 전압의 경우, 선간 전압과 상전압 모두 사용할 수 있지만, PWM 컨버터 제어 등을 고려하면 상전압을 사용하는 것이 유용하다. 다만, 계통 시스템에서는 선간 전압으로 정의하는 경우가 많으므로 유의해야 한다. 그리고 실효값(root mean square)을 사용한다.

앞서 설정한 기준을 바탕으로, 전류, 임피던스, 각주파수 등의 기저값을 계산할 수 있다.

$$I_{base} = \frac{P_{base}}{3} \times \frac{1}{V_{base}} \quad [Arms]$$

$$Z_{base} = V_{base} / I_{base} \quad [\Omega]$$

$$\omega_{base} = 2\pi f_{base} \quad [rad/s]$$

$$L_{base} = \frac{Z_{base}}{\omega_{base}} \quad [H]$$

$$C_{base} = \frac{1}{\omega_{base} Z_{base}} \quad [F]$$

본 문서는 3상 PWM 컨버터를 가정하였으므로, 전류 기저값을 계산할 때 상당 전력을 계산하고, 이를 전압 기저값으로 나눈다. 여기서는 전압을 상전압으로 정의하였음을 유의한다.

임피던스 기저값은 전압, 전류 비로 계산되며, 저항 기저값은 임피던스 기저값과 같다. 인덕턴스와 캐패시턴스 기저값을 계산하기 위해서, 각주파수 기저값을 정격주파수 기반으로 계산한다. 인덕턴스와 캐패시턴스 기저값은 모든 전력이 지상 혹은 진상 전력일 때를 기반으로 계산한다.

Example

250 kW, 5 kW 급 3상 PWM 컨버터를 계통에 연결하는 상황을 가정하여 Per-unit system으로 표현해보자.

먼저 250 kW 급 3상 PWM 컨버터가 440 V 선간 전압에 연결되는 상황을 가정하면 각 기저값은 아래와 같이 계산할 수 있다.

$$P_{base} = 250,000 \quad [W]$$

$$V_{base} = 440 / \sqrt{3} \approx 254 \quad [V_{rms}]$$

$$f_{base} = 60 \quad [Hz]$$

$$I_{base} = \frac{250,000}{3} \times \frac{1}{254} \approx 328 \quad [Arms]$$

$$Z_{base} = 0.77 \quad [\Omega]$$

$$\omega_{base} = 376.99 \approx 377 \quad [rad/s]$$

$$L_{base} = 2.04 \quad [mH]$$

$$C_{base} = 3.44 \quad [mF]$$

다음은 5 kW 급 3상 PWM 컨버터가 220 V 선간 전압에 연결되는 상황을 가정하여 기저값을 계산하였다.

$$\begin{aligned}
 P_{base} &= 5,000 & [\text{W}] \\
 V_{base} &= 220/\sqrt{3} \approx 127 & [\text{V}_{\text{rms}}] \\
 f_{base} &= 60 & [\text{Hz}] \\
 I_{base} &= \frac{5,000}{3} \times \frac{1}{127} = 13.1 & [\text{Arms}] \\
 Z_{base} &= 9.69 & [\Omega] \\
 \omega_{base} &= 376.99 \approx 377 & [\text{rad/s}] \\
 L_{base} &= 25.7 & [\text{mH}] \\
 C_{base} &= 274 & [\mu\text{F}]
 \end{aligned}$$

Circuit simulation

Per-unit system으로 동일한 물리량을 가진 시스템은 같은 제어 결과를 보여 준다는 예시로, 앞서 계산한 250 kW, 5 kW 급 3상 PWM 컨버터를 계통에 연결하는 상황을 가정한 시뮬레이션의 전류 제어 결과를 비교해 볼 수 있다.

시뮬레이션 조건에서 직류단 전압은 전압을 충분히 함성할 수 있도록 각각 선간 전압 피크 값의 1.2배를 가정하였고, 각각 746 V_{dC}, 373 V_{dC}로 설정하였다. PWM 컨버터의 주파수는 10 kHz로 동일하게 설정하였으며, PLL과 전류제어기 BW 역시 동일하게 각각 20 Hz, 100 Hz로 설정하였다. 고조파 필터는 L 필터를 가정하였으며, 기저값의 10%, 즉 0.1 pu로 설정하였다. 즉, L_{base} 에 0.1을 곱한 값으로 각각 0.204 mH, 2.57 mH가 고조파 필터로 사용되었다.

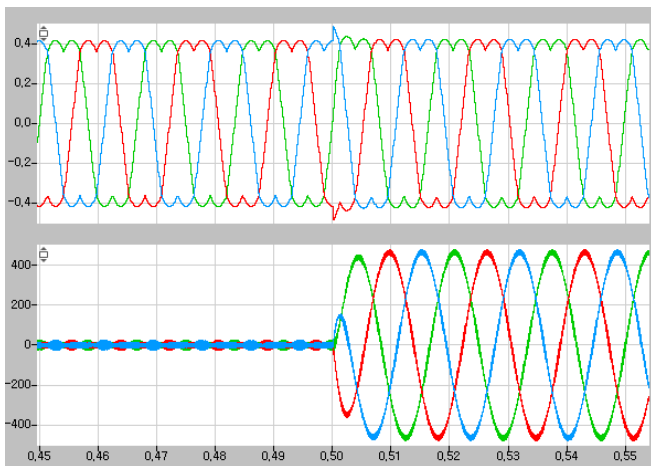


그림 1.250 kW 급 3상 PWM 컨버터

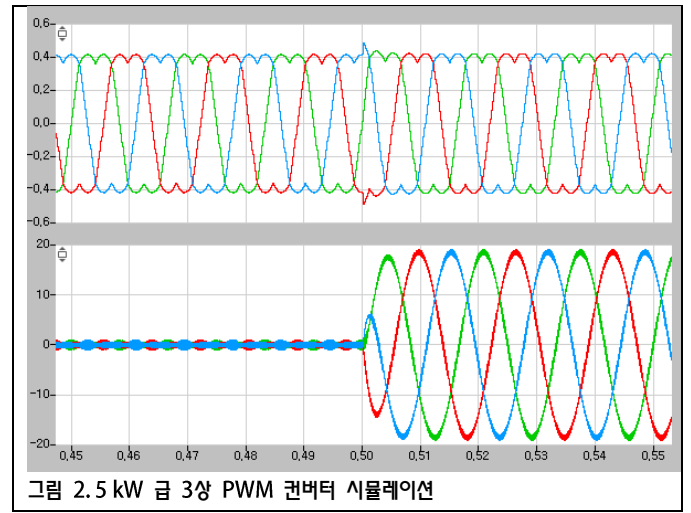


그림 2.5 kW 급 3상 PWM 컨버터 시뮬레이션

본 문서에서는 자세한 설명은 생략하지만, 두 시뮬레이션 결과를 비교하였을 때, 동일한 PU 값의 L 필터를 사용하였을 때, 제어 응답성, PWM 고조파 특성이 나타나는 것을 확인할 수 있다.

필자의 의견으로는 임의의 용량 및 전압 사양의 PWM 컨버터라도, PU 값 기준으로 필터 설계를 하고, 제어를 물리량 기준으로 설계하여 BW를 설정하면 된다. 스위칭 리플의 크기 역시 상대값 기준으로 생각하면 되므로, Per-unit system을 기반으로 쉽게 용량 변화에 따른 파형 변화를 예측할 수 있다.

Grid impedance and transformer SCR

추가로, 변압기 SCR(short circuit ratio)을 기준으로 계통 임피던스를 계산할 때에도 Per-unit system을 기반으로 합리적인 값을 설정할 수 있다. SCR 20인 경우 5%의 계통 임피던스, SCR 2인 경우 50%의 계통 임피던스로 산정된다. 접속 변압기의 SCR을 아는 경우, 인덕턴스 값을 산출할 수 있으며 이를 PU 값으로 환산하여 강한 계통인지, 약한 계통인지 판별할 수 있다.

본 자료는 대략적인 정보 전달을 위한 매거진으로, 기술상의 오류가 있을 수 있으며, 최신 동향이 누락될 수 있습니다. 상세한 지식과 정보를 얻기 위해서는 교재 및 논문 등을 참고하시기 바랍니다.

Reporting: benkim@plecko.biz