

계통연계형 인버터의 LCL필터 커패시터 불평형 고장시 커패시터 역상분 전압의 크기

이효준, 송승호

광운대학교 전기공학과

The Magnitude of Negative Sequence Voltage of the LCL Filter for Grid-tied Inverter under Unbalanced Capacitor Fault Condition

Hyo-Jun Lee, Seung-Ho Song

Department of Electrical Engineering, Kwangwoon University, Seoul, Korea

ABSTRACT

본 논문은 계통연계형 인버터의 LCL 필터에서 커패시터의 열화 특성을 확인하기 위해 필터 공진 주파수에 해당하는 정상분 전압을 주입한 뒤 LCL필터의 임피던스 불평형으로 인해 커패시터 양단에 나타나는 역상분 전압의 크기를 측정해 LCL 필터 불평형 고장을 진단하는 기법을 제안한다. 스위칭 고조파 혹은 발열 등에 의해 커패시터가 노화가 되면 용량이 감소하게 되고, 이는 저주파 통과 필터로 사용되는 LCL 필터의 성능 감소를 야기하게 되며, 이로 인해 출력 전류의 THD(Total Harmonic Distortion)가 증가하게 된다. THD 증가 방지를 위해 계통연계형 인버터에서는 필터 커패시터의 용량을 모니터링 하게 되고 일반적으로 80% 이하로 용량이 감소할 경우 고장으로 판단한다. 기존에 사용하는 커패시터 용량 감소 검출 방식들은 커패시터의 용량이 3상 평형이라는 가정이 있어야 사용이 가능하지만, 본 논문에서는 커패시터에 불평형 고장이 발생한 경우에도 검출이 가능하게 했다.

1. 서론

현재 대부분의 재생에너지 발전원은 인버터를 이용해 계통과 연결된다. 이때 인버터는 PWM 동작을 통해 출력을 제어하므로, 스위칭 노이즈를 제거하기 위해 출력단에 LPF(Low Pass Filter)를 부착한다.

LPF로는 일반적으로 높은 감쇠율을 갖는 LC 또는 LCL 필터를 사용되는데, 이때 사용되는 커패시터에 고장이 발생함에 따라 용량이 감소하게 되면 필터의 차단 주파수가 올라가게 되고, 결과적으로 출력 THD가 증가하는 문제가 있다. 해당 문제를 방지하기 위해 80% 정도 커패시터 용량이 감소하게 되면 고장으로 판별하게 되고, 실시간으로 커패시터 용량을 모니터링하는 다양한 논문이 나와 있다.

기존의 논문은 커패시터의 용량이 80% 감소한 필터의 공진 주파수에 해당하는 전압을 주입하면서 나타나는 필터 커패시터 양단 전압의 크기를 관측하는 방법^[1]과 선형 회귀를 이용해 LCL 필터의 파라미터를 관측하는 방법^[2] 등이 제시되었다. 하지만, 이러한 방식들은 3상의 회로 소자의 값이 모두 동일하다는 가정을 하고 있다.

본 논문에서는 3상 필터 소자 중 한 상의 커패시터에 고장이 발생했을 때 필터의 공진주파수에 해당하는 전압을 주입하고 커패시터 양단에 발생하는 역상분 전압의 크기를 관측해 커패시터 불평형 고장을 감지하는 방식을 제안한다.

2. 커패시터 용량 불평형 감지

2.1 등가회로 분석

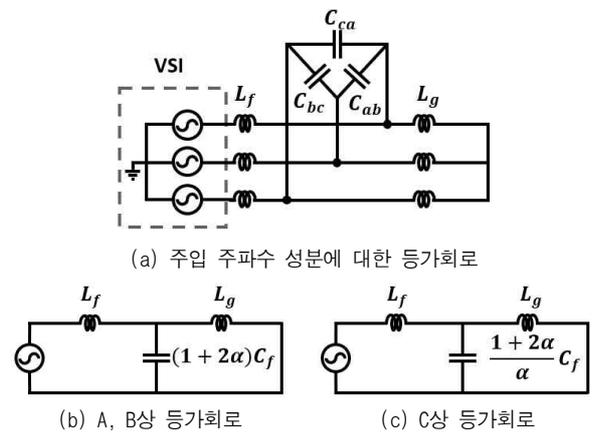


그림 1 전압 주입시 상당 등가회로

Fig. 1 Equivalent circuit for voltage injection

인버터를 통해 계통 정격 주파수 60 Hz보다 높은 주파수를 주입하고, 이에 대한 커패시터 전압 주파수 특성을 본다면 계통 전압에 해당 주파수 성분이 없다는 가정을 통해 그림 1 (a)와 같이 등가 회로를 그릴 수 있다. 또한, AB선간 커패시터만 고장 전 커패시턴스 C_f 보다 α 만큼 감소했다고 한다면 식 (1)과 같이 표현이 가능하다.

$$\begin{cases} C_{ab} = \alpha C_f (0 \leq \alpha \leq 1) \\ C_{bc} = C_{ca} = C_f \end{cases} \quad (1)$$

Δ -Y 변환을 통해 상당등가 회로를 구해보면 식(2)가 된다.

$$\begin{cases} C_a = C_b = (1 + 2\alpha)C_f \\ C_c = \frac{1 + 2\alpha}{\alpha} C_f \end{cases} \quad (2)$$

(2)를 이용해 인버터의 주입 전압에 대한 커패시터 전압의 응답을 구하면 식(3)이 나오고, 이를 토대로 그림 2가 나온다.

$$\begin{cases} \left| \frac{V_c}{V_{inv}} \right|_{\text{phase A,B}} = \frac{L_g}{-L_g L_f (1 + 2\alpha) C_f \omega^2 + L_g + L_f} \\ \left| \frac{V_c}{V_{inv}} \right|_{\text{phase C}} = \frac{L_g}{-L_g L_f \frac{(1 + 2\alpha)}{\alpha} C_f \omega^2 + L_g + L_f} \end{cases} \quad (3)$$

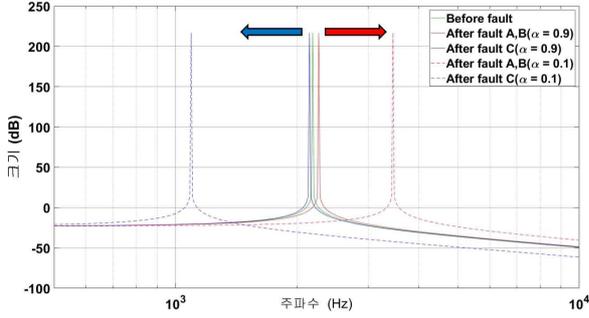
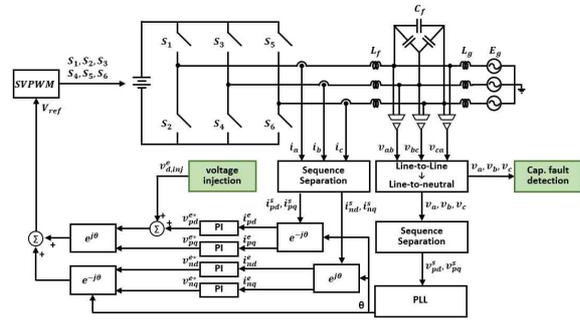


그림 2 V_c/V_{inv} 주파수 특성

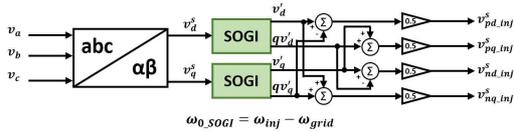
Fig. 2 V_c/V_{inv} frequency characteristic

그림 2를 보면 커패시터의 불평형이 커질수록 A, B 상의 공진주파수는 증가하고, C 상의 공진 주파수는 감소하는 것을 볼 수 있다. $\alpha = 0.9$ 일 때의 공진 주파수에 해당하는 전압을 주입하면 선간 커패시터에 10% 불평형이 발생했을 때, C 상의 커패시터 전압과 A, B 상의 커패시터 전압에 불평형이 발생해 역상분 전압이 발생할 것인 것을 알 수 있다.

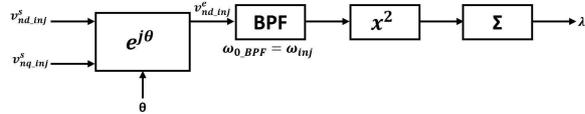
2.2 제어 블록도



(a) 전체 회로도 및 제어 블록도



(b) 주입 주파수에 대한 전압 정상분/역상분 분리



(c) 커패시터 전압 역상분 크기 측정

그림 3 커패시터 불평형 검출 블록도

Fig. 3 Capacitor unbalance detection block diagram

계통 연계형 인버터의 제어 방식은 그림 3-(a)와 같고, 식(4)의 전압을 주입하게 되면 고정 좌표계에서는 (5), (6)과 같은 전압이 주입되므로, 실제로 주입하고자 하는 주파수에 계통 주파수를 더한 값이 ω_{inj} 가 되도록 해야 한다.

$$V_{d, inj}^e = M_{inj} \sin(\omega_{inj} t) \quad (4)$$

$$V_{d, inj}^s = \frac{M_{inj}}{2} \sin\{(\omega_{inj} - \omega_{grid})t\} - \frac{M_{inj}}{2} \sin\{(\omega_{inj} + \omega_{grid})t\} \quad (5)$$

$$V_{q, inj}^s = \frac{M_{inj}}{2} \cos\{(\omega_{inj} - \omega_{grid})t\} - \frac{M_{inj}}{2} \cos\{(\omega_{inj} + \omega_{grid})t\} \quad (6)$$

커패시터 전압 역상분을 추출하기 위해서는 SOGI를 이용해 주입한 주파수 성분이 90도 위상이 진상된 q 출력이 나오도록 했고, 주입한 주파수 이외의 성분은 감쇠시키기 위해 BPF를 이용했으며, 역상분 전압의 크기 정보를 얻기 위해 식(7)을 이용했다.

$$\lambda = \sum_{n=1}^N \{v_{nd, inj, BPF}^e[n]\}^2 \quad (N = T_{grid}/T_{samp}) \quad (7)$$

3. 시뮬레이션

표 1 시뮬레이션 파라미터

Table 1 Parameters for the simulation

파라미터	값	파라미터	값
V_{dc}	1200 V	V_{grid}	690 V
L_f	2 mH	L_g	0.15 mH
R_f	11 mΩ	R_g	11 mΩ
C_f	12.67 μF	f_{sw}	10 kHz
f_{samp}	50 kHz	M_{inj}	20 V
ω_{inj}	2.32 kHz	I_{rated}	100 A
	2.41 kHz		

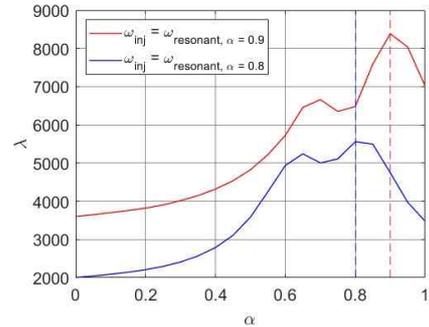


그림 4 커패시터 불평형에 따른 역상분 전압 크기

Fig. 4 Capacitor negative sequence voltage for asymmetric capacitance

표 1의 ω_{inj} 는 $\alpha = 0.9, 0.8$ 의 공진주파수를 각각 주입한 경우로 2가지의 시뮬레이션을 진행했고, 그림 4의 결과와 같이 두 가지 경우 각각 $\alpha = 0.9, 0.8$ 일 때 λ 가 최댓값이 되었다.

이를 이용해 적절한 λ 의 한계치를 정한다면, 불평형 고장 검출이 가능할 것인 것 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 고조파 정상분 전압을 주입했을 때 나타나는 커패시터 전압 역상분의 크기를 이용해 커패시터 불평형 고장을 검출할 수 있다는 것을 보여줬다.

향후 연구에서는 고장 판단을 위한 커패시터 역상분 전압 크기의 한계치 값 선정에 대한 분석을 진행한다.

참고 문헌

- [1] Hong-Jun Heo, Won-Sang Im, Jang-Sik Kim, Jang-Mok Kim, "A Capacitance Estimation of Film Capacitors in an LCL-Filter of Grid-Connected PWM Converters", JOURNAL OF POWER ELECTRONICS, Vol. 13, No. 1, pp. 94-103, 2013, January.
- [2] V. Pirsto, J. Kukkola, F. M. M. Rahman and M. Hinkkanen, "Real-Time Identification of LCL Filters Employed With Grid Converters", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 56, No. 5, pp. 5158-5169, 2020, September-October