

계통연계형 3상 PWM 컨버터에서 LCL필터의 필름 커패시터 열화 진단

김장식*, 임원상*, 김장목*, 오형식**, 최 철**
 부산대학교*, (주)하이젠 모터**

Deterioration Diagnostic of Film Capacitor included LCL Filter in Grid-connected Three-phase PWM Converter

Jang-sik Kim*, Won-sang Im*, Jang-mok Kim*, Hyung-Shic Oh**, Cheol Choi**
 Pusan National University*, Higen Motor Co.**

Abstract

3상 PWM 컨버터에서 LCL필터 필름 커패시터는 Self-healing 메커니즘에 의해 열화가 진행되며, 이는 시스템의 필터성과 역률 저하로 이어진다. 따라서 계통측 커패시터의 고장을 판단하고 교체시기를 결정하는 것이 필요하다. 본 논문에서는 정전용량의 80%에 해당하는 공진주파수를 한 주기 동안 주입하였을 때 나타나는 응답의 변화를 통해 커패시터의 열화고장진단 알고리즘을 제안하였다.

1. 서론

그림1은 LCL필터 구조를 갖는 전형적인 계통연계형 3상 PWM 전압형 컨버터이다[1]. LCL필터의 커패시터는 사용환경 및 장시간 사용에 따라 열화 고장이 발생한다. 열화고장의 진행은 스위칭 주파수의 배수에 해당하는 큰 고조파 전류가 커패시터에 유입되면서 그림2와 같이 유전체 필름의 낮은 임피던스 부분으로 미세한 누설 전류가 발생이 되고 ESR에 기인한 내부 손실에 의해 발열이 된다. 이에 유전체 필름의 손상은 가속화 되며 커패시터는 정전용량의 감소 후에 정상 동작을 하게 되는 Self-healing 과정을 거쳐 열화가 이뤄진다. 일반적으로 커패시터는 초기 정전용량 대비 20% 감소를 고장으로 판단한다. 그러나 고장 이후의 지속적인 사용은 커패시터 내부의 용융으로 쇼트가 발생할 우려가 있으므로 커패시터의 열화고장진단이 요구된다[2].

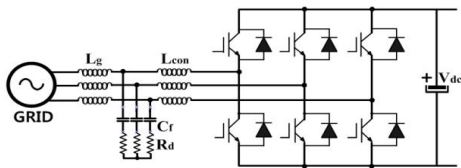


그림 1. LCL필터를 포함한 계통연계형 3상 PWM 컨버터

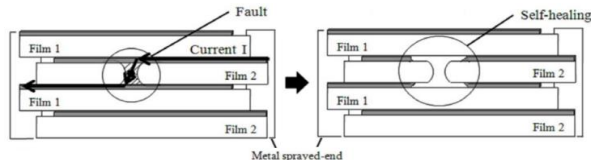


그림 2. MPPF 커패시터의 Self-healing 메커니즘

2. 커패시터 열화가 시스템에 미치는 영향

그림3(a)와 같이 커패시터 정전용량 감소는 필터 성능의 저하로 나타난다. 초기 정전용량에 대한 20% 감소시의 공진주파수를 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

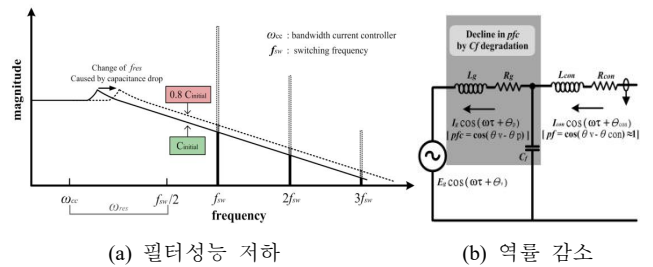


그림 3. 커패시터 열화가 시스템에 미치는 영향

$$f_{res_fault} = 1.118 \times f_{res_initial} \quad (1)$$

그림3(b)에서 보면 계통측 전류의 역률은 제어영역 밖에 있으며, 일반적으로 무효분을 고려하여 역률이 0.95이상 이 되도록 L_g 와 C_f 가 설계된다. 합성 임피던스를 기반으로 고장시점의 역률은 식(2)과 같이 나타낼 수 있다.

$$pfc_{fault} = 0.931 \times pfc_{initial} \quad (2)$$

3. 필터측 커패시터 열화진단 알고리즘

계통측 커패시터 열화진단을 위한 3상 PWM 컨버터의 제어알고리즘은 그림4와 같다. 무효성분인 d 축 전압지령에 식(3)과 같이 80% 정전용량에 대한 공진주파수 성분을 계통주파수의 한 주기 동안 주입함으로써 유효전력성분에 영향을 받지 않으며 부하와 DC단 전압에 독립적인 진단이 가능하다.

그림4에서의 지령전압 V_{abc}^* 는 주입되는 한 주기 동안 식(3)을 역변환한 식(4)의 $V_{abc_inj}^*$ 이 더해진 값이 된다.

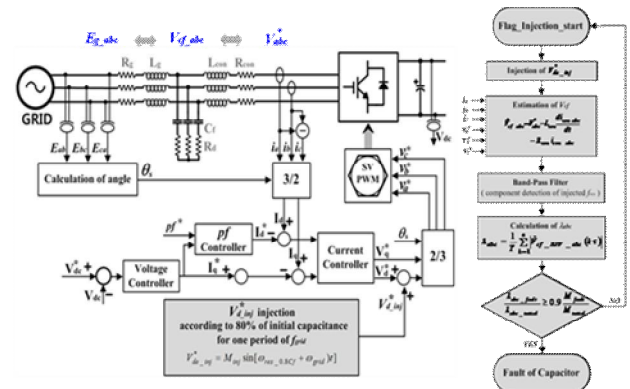


그림 4. 열화진단을 위한 컨버터의 제어블록도 ($V_{de_inj}^*$ 주입)

$$V_{de_inj}^* = M_{inj} \sin[(\omega_{res_0.8Cf} + \omega_{grid})t] \quad (3)$$

$$\begin{aligned} V_{a_inj}^* &= \frac{M_{inj}}{2} \sin(\omega_{res_0.8Cf} t) - \frac{M_{inj}}{2} \sin[(\omega_{res_0.8Cf} + 2\omega_{grid})t] \\ V_{b_inj}^* &= \frac{M_{inj}}{2} \sin(\omega_{res_0.8Cf} t - \frac{2}{3}\pi) - \frac{M_{inj}}{2} \sin[(\omega_{res_0.8Cf} + 2\omega_{grid} - \frac{2}{3}\pi)t] \\ V_{c_inj}^* &= \frac{M_{inj}}{2} \sin(\omega_{res_0.8Cf} t + \frac{2}{3}\pi) - \frac{M_{inj}}{2} \sin[(\omega_{res_0.8Cf} + 2\omega_{grid} + \frac{2}{3}\pi)t] \end{aligned} \quad (4)$$

식(5)는 계통측 커패시터의 추정된 전압을 나타낸다.

$$\hat{v}_{cf_abc}^* = v_{abc}^* - L_{con} \frac{di_{con_abc}}{dt} - R_{con} i_{con_abc} \quad (5)$$

대역통과필터를 통해 80% 정전용량의 공진주파수에 대한 응답만을 검출할 수 있다[3]. 식(6)은 필터를 통과한 \hat{v}_{cf_BPF} 의 한 주기 절대치 평균값 λ_{abc} 이고, 초기정전용량에 대한 $\lambda_{abc_initial}$ 값과 변화된 정전용량에 대한 $\lambda_{abc_measured}$ 값에 비는 γ_{abc} 이다.

$$\lambda_{abc} = \frac{1}{T} \sum_{k=1}^n |\hat{v}_{cf_BPF_abc}(kT)| \quad \gamma_{abc} = \frac{\lambda_{abc_measured}}{\lambda_{abc_initial}} \quad (6)$$

초기조건과 고장조건시의 시스템 전달함수의 크기 이득은 식(7)과 식(8)로 나타낼 수 있다.

$$\omega_{inj} M_{initial} = \frac{k_1 \omega_{inj} + k_2 / C_{f_initial}}{\sqrt{(\omega_{res_initial}^2 - \omega_{inj}^2)^2 + (2\zeta \omega_{res_initial} \omega_{inj})^2}} \quad (7)$$

$$\omega_{inj} M_{fault} = \frac{k_1 \omega_{inj} + k_2 / C_{f_fault}}{2\zeta \omega_{inj}} \Big|_{\omega_{res}=\omega_{inj}} \quad (8)$$

여기서, $k_1 = \frac{R_d}{L_{con} L_g}$, $k_2 = \frac{1}{L_{con} L_g}$, $\omega_{res} = \sqrt{\frac{L_{con} + L_g}{C L_{con} L_g}}$, $\zeta = \frac{1}{2\omega_{res}} \left(\frac{R_d}{L_{con}} + \frac{R_d}{L_g} \right)$

결과적으로 열화고장은 식(9)을 통해 판별된다. 여기서 ρ 는 초기조건과 고장시 크기 이득의 비를 나타낸다.

$$\gamma_{abc} \geq 0.9\rho \quad (\rho = \frac{\omega_{inj} M_{fault}}{\omega_{inj} M_{initial}}) \quad (9)$$

3. 시뮬레이션

시뮬레이션 파라미터는 표1과 같다. 그림5는 커패시터 열화로 정전용량이 감소함에 따라 공진주파수가 이동함을 보여준다. 그림6처럼 열화고장시점의 정전용량인 30uF에서 계산된 공진 주파수 성분을 계통 주파수의 한 주기 동안 d축 전압 지령에 주입시켰다. 그림7과 같은 계통측 커패시터의 a상 전압 성분을 BPF를 통해 그림8와 같이 검출하였고, 계통주파수 한 주기에 대한 절대치 평균값은 λ_a 이다. 그림9는 계산값의 비와 측정값의 비가 보드선도의 dB이득차와 일치함을 보여준다.

표 1 시뮬레이션 파라미터

계통 전압	3Φ 220V 60Hz	Lg/ Lcon	0.15 mH / 2 mH
스위칭 주파수	10 kHz	Cf / Rd	38 uF/ 0.4Ω

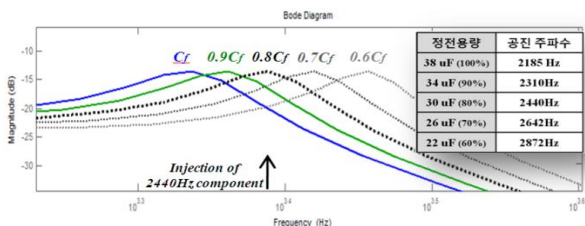


그림 5. 커패시터의 정전용량의 감소로 공진주파수의 이동

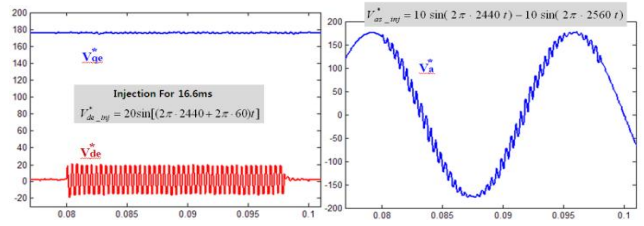
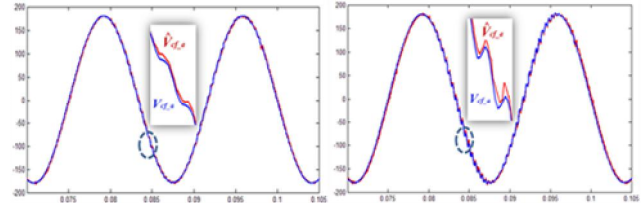


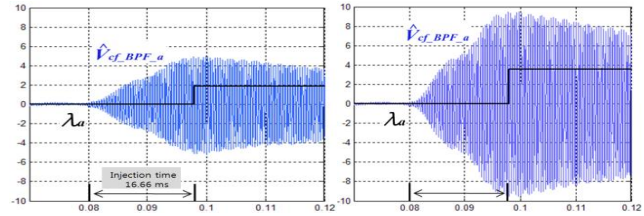
그림 6. 한 주기 동안의 $V_{de_inj}^*$ 주입과 $V_{a_inj}^*$



(a) In case of $C_{f_initial}=38\mu F$

(b) In case of $C_{f_fault}=30\mu F$

그림 7. 커패시터 전압 추종



(a) In case of $C_{f_initial}=38\mu F$

(b) In case of $C_{f_fault}=30\mu F$

그림 8. BPF에 의한 2440Hz 성분 검출과 절대치 평균값 λ_a

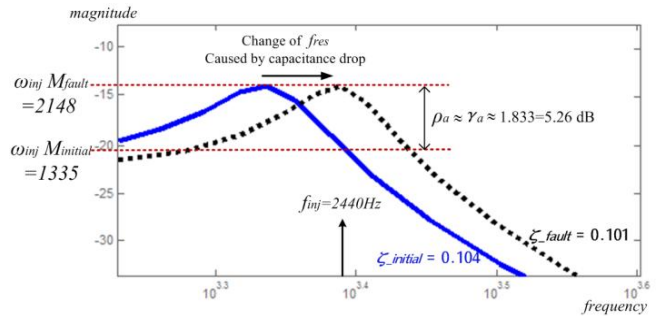


그림 9. 초기시점과 고장시점의 정전용량에 대한 보드선도

3. 결론

본 논문에서는 LCL필터의 커패시터 교체시기를 결정하기 위한 알고리즘을 제안하였다. 동기좌표계의 d축 전압 지령에 커패시터 고장 시점의 공진주파수 성분을 주입하였고, 그 때의 커패시터 전압을 추종하여 그 응답을 BPF를 통해 검출한 뒤, 그 절대값 평균의 비를 통해 계산값과 비교하여 열화고장 시점을 진단하였다. 제안된 알고리즘은 MATLAB 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

본 연구는 지식경제부 지원하는 동남광역경제권 선도 산 R&D 중 “모듈형 전원회생 유니트 및 드라이브 일체형 22kW급 동기전동기 시스템 개발” 과제에 의해 수행되었음

Reference

[1] Liserre, M. "Design and control of an LCL-filter based three-phase active rectifier", IEEE, Vol. 1, No. 1, pp. 299-307, 2001.

[2] A. Borghetti, "Tests on Self-healing Metallized Polypropylene Capacitors for Power Application", IEEE Trans, Vol. 10, No. 1, pp. 556-561, January.

[3] Ishizak, T. "Digital assistable inverter-based band-pass filter", IEEE, Vol. 1, pp. 1-41-4, 2004.