

차단기의 50/60Hz 공용주파수 정격의 시험방법에 관한 검토

서운택\*, 박승재, 이용한, 김맹현, 윤학동, 김대원  
한국전기연구원

A study on the combination of tests on circuit breakers at 50Hz and 60Hz

Yoon-Taek Suh, Seung-Jae Park, Yong-Han Lee, Maeng-Hyun Kim, Hak-Dong Yun, Dae-Won Kim  
KERI, High power testing department I

**Abstract** - 본 논문에서는 전력 계통에서 보호기기로 사용되는 차단기의 50/60Hz 공용주파수 정격의 시험방법에 대하여 기술 하였다. 그 과정으로 차단기의 개발시험 항목에 대한 시험목적, 전류투입차단시 차단기에 미치는 영향 및 국제적으로 적용되고 있는 관련 적용규격을 고찰하고 50 Hz 및 60 Hz 공용정격으로서 성능을 검증할 수 있는 방안을 제시한다.

1. 서 론

상용주파수는 세계적으로 50Hz와 60Hz를 쓰고 있다. 그러나 항공기 등 일부 다른 곳에서는 기기의 소형화를 위해 50Hz나 60Hz가 아닌 400Hz를 사용하고 있는 경우도 있다. 우리나라를 비롯한 미국, 남미 등은 60Hz를 사용하고 있으며, 유럽, 중동 등의 국가에서는 50Hz를 상용주파수로 쓰고 있다. 일본의 경우는 지방에 따라 50Hz와 60Hz를 쓰고 있다. 이와 같이 상용주파수는 그 나라가 초기 전기산업을 시작할 때 지리적 위치와 어느 나라 기술을 받아 들었나에 따라 50Hz 또는 60Hz를 쓰고 있다. 상용주파수가 바뀔에 따라 전력계통에서 사용되는 전력기는 상용주파수를 고려하여 설계하여야 한다. 그러나 최근 전력기기의 개발 동향은 해외 수출 및 원가절감을 위하여 50/60Hz 공용주파수 정격기기를 개발하고 있는 추세다. 따라서 본 논문에서는 전력 계통에서 보호기기로 사용되는 차단기의 상용주파수에 따른 각 시험항목별, 즉 상용주파내전압시험, 온도상승시험, 단시간전류시험, 기본단락투입시험, 진상소전류개폐시험 및 지상소전류개폐시험에 관해서 각 주파수별로 시험의 가혹도를 검토하여 규격에 적합하고 기술적으로 타당성 있는 시험방법을 제시하고자 한다.[1],[2],[3]

2. 본 론

2.1 상용주파 내전압시험

전력기기의 절연성능을 평가하기 위하여 교류 전압을 단시간 또는 장시간 인가하는 시험으로서 IEC, IEEE 등 규격에서는 상용주파 내전압시험을 50Hz로 실시하여도 60Hz에 대한 성능평가를 인정하며 반대의 경우도 마찬가지이므로 시험은 50 또는 60Hz로 시험하여도 무방하다. 다만 주파수에 따른 절연체 절연파괴전압이 주파수에 반비례하므로 시험주파수는 60Hz로 실시하는 것이 적절하다.

2.2 온도 상승시험

전력기기에 정격전류를 연속해서 통전시켜 주열에 의해 발생하는 온도상승을 측정하는 시험으로서 규격 IEC에서는 60Hz 시험결과를 50Hz에서도 인정하고 있다.

2.3 단시간전류시험

전력계통의 단락 고장시 발생하는 전류에 의한 초기 피크 전류에 의한 전자력에 따른 기계적 내력시험과 통전시간에 의한 열용량에 대한 열적내력을 확인하는 시험으로서 IEC에서는 주파수에 따른 성능평가 결과에 주의를 요하고 있으나 STL에서는 주파수에 관련 없이 피크를 2.6배로 규정하고, IEEE에서는 주파수 50/60에 따라 피크를 2.6/2.5배로 규정하고 있으므로 시험 주파수는 60Hz로 실시하는 것이 적절하다.

2.4 단락투입차단시험

전력계통에서 발생하는 고장의 종류는 지락, 선간단락, 3상단락으로 구분할 수 있으며, 이 외에 계통연계시 동기의 상실로 인해서 발생하는 탈조상태등이 있으며 이를 총괄해서 단락사고라고 한다. 이러한 단락전류의 특성은 선로에 존재하는 유도임피던스에 의해서만 제한되기 때문에 전압과 전류의 위상차는 거의 90도에 가깝고 수십 kA정도에 가까운 지상전류이다. 이러한 대전류 차단에 있어서 중요한 요소로는 대전류 아크에너지(아크시간)로 인한 접점소모, 차단지점에서의 전류의 기울기 및 차단 후 발생하는 과도회복전압으로서 50 Hz 및 60 Hz 계통에서의 상호관계는 1)아크에너지 : 50 Hz > 60 Hz, 2)전류 기울기 : 50 Hz < 60 Hz, 3)과도회복전압 : 50 Hz = 60 Hz이므로 양자에 대한 성능검증이 필수적이다. 식-(1)은 정상상태의 상용주파수 전류이고, 식-(2)는 고장순간에 발생하는 직류분 전류로서 식-(4)는 과도상태가 소멸된 후 차단해야 하는 전류영역에서의 기울기이며, 이 전류의 기울기는 주파수에 비례한다.

$$i_s = \left[ \frac{\sqrt{2}E}{Z} \right] [ \sin(\omega t + \theta + \phi) ] \tag{1}$$

$$i_t = [ \sqrt{2}E ] [ \sin(\theta - \phi) e^{-\frac{-R_1 t}{L}} ] \tag{2}$$

$$i = i_s + i_t \tag{3}$$

$$\frac{di_s}{dt} = \frac{\sqrt{2}\omega E}{Z} \tag{4}$$

$$\text{여기서, } \omega = 2\pi f, \quad \phi = \tan^{-1} \frac{\omega L}{R_1},$$

$$X_s = \omega L, Z = \sqrt{R_1^2 + X_s^2}$$

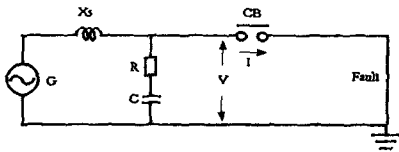
$$R_1 = X_s \text{의 내부저항}$$

2.4.1 대전류차단 과정

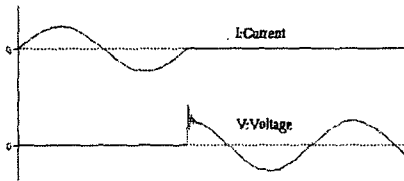
- 대전류 구간 : 대전류로 인한 극간 아크(전류크기, 시간)의 영향을 접점소손, 아크에 의한 절연 열화
- 상호 작용구간 : 전류 차단 직후 발생하는 TRV와 Post 아크에 의한 영향
- 차단전류 영역에서 전류 기울기, Post arc 전류, 초기 TRV
- 고전압 구간 : 차단 후 극간/상대지간에 발생하는 TRV와 RV의 영향

**2.4.2 대전류 차단시 고려 사항**

- 아크 에너지 : 대전류 차단시 아크 시간(ta)의 window에 따른 에너지 차이로 모든 규격이 아크시간 window를 절대 시간이 아닌 각도로 규정하고 있음. 따라서, ta(50Hz) > ta(60Hz)인 관계로서 주파수에 반비례하고, 그림 2와 같이 단락투입시험의 Pre-arc에 대한 특성은 주파수에 따라 별 차이가 없음.
- 영점에서 전류 기울기 : 차단전류가 symmetrical인 경우 영점에서 기울기는  $\sqrt{2} \omega I$ 로 표시되고 즉 주파수에 비례한다. 따라서, 보통 60Hz에서는 10kA당 5.33A/ $\mu$ s, 50Hz에서는 10kA당 4.44A/ $\mu$ s로 계산된다
- 과도회복전압 : SLF의 초기 initial 삼각파를 제외한 모든 TRV는 주파수에 관계없이 동일하게 규정
- SLF의 초기전압 : SLF 차단시 발생하는 삼각전압의 상승률은  $\sqrt{2} IZ\omega$  로서 주파수에 비례함.



(a) 등가회로



(b) 전압, 전류 파형  
그림-1 단락전류 차단특성

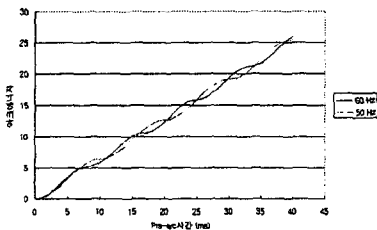


그림 2 투입시험의 주파수에 따른 Pre-arc 특성

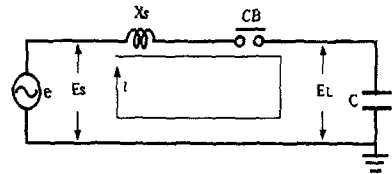
**2.4.3 검토 결과**

- IEC, IEEE : 주파수에 따른 성능평가 결과에 주의 를 요하고 있음.
- STL : 시험 duty에 따른 단락전류의 크기에 따라 시험주파수를 선별 적용
- 50 or 60Hz를 택일하는 시험항목(T10, 30, 탈조) 은 시험전류가 정격단락전류의 50% 미만인 것이며,
- 50 and 60Hz 모두를 시험하는 항목은 시험전류가 50% 이상임.
- 즉 대전류 차단에 있어서 아크시간에 따른 아크에너지(ta)와 전류 영점에서의 전류 기울기(di/dt)의 한계 점에 대한 구분을 50% 정도로 하고 있음.
- 따라서 50% 이하의 비교적 낮은 전류(T10, T30, 탈조, 임계전류)는 전류의 기울기 측면을 고려하여 60Hz에서 시험함.
- 근거리 선로고장(SLF)의 경우 차단전류의 특성(ta,

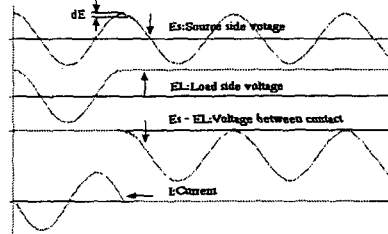
di/dt) 및 선로측 특성이 주파수에 따라 달라지므로 양 주파수에 대한 시험을 별도로 실시한다.

**2.5 진상 소전류 개폐시험**

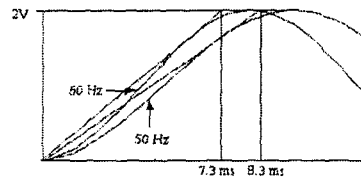
전력계통에서 발생하는 진상소전류의 종류로는 1)무부하 가공선로에 존재하는 Stray capacitance에 의한 선로충전전류, 2)무부하지중선로에 존재하는 Stray capacitance에 의한 케이블충전전류, 3)역율조정용으로 사용되는 콘덴사군에 의한 콘덴사군전류, 4)유도성 정전용량에 의한 정전유도전류등으로 구분할수 있다. 이러한 진상소전류를 차단할 경우에는 그림-1에서 알 수 있는 것처럼 1)전원측전압(ES)은 상용주파수의 교류전압, 2)부하측전압(EL)은 Capacitance에 충전되는 직류전압, 3)극간(Et=ES-EL)에는 상용주파수 전압첨두치의 2배의 전압이 발생하며, 이 전압에 도달하는 시간은 50 Hz인 경우는 8.3 ms, 60Hz인 경우는 7.3ms 로서 극간절연파괴 유무를 검증하는데 있어서는 60 Hz 인 경우가 더 가혹한 것을 알수 있다.



(a) 등가회로



(b) 전압, 전류파형



(c) 극간전압

그림 3 진상소전류 차단현상

진상전류는 최대 수백 A 정도로 매우 작으며, 아크시간도 아주 작으므로 전류의 아크에너지로 인한 영향은 미미하다. 그러나 차단 후, 발생하는 2배 전압에 대한 절연유지 여부가 핵심 사항이고, 즉 전압 피크점 부근에서 발생하는 재점호(Restrike) 여부가 이 시험의 핵심 사항으로서 60Hz에서 피크전압 도달시간이 빠르므로 60Hz로 시험하는 것이 타당하다.

**2.6 지상소전류 차단특성**

무부하 변압기의 여자전류, 분로리액터의 전류, 전동기의 가동시 발생하는 전류등 유도성 부하에 의한 전류를 지상소전류라고 한다. 이러한 지상소전류는 전류의 크기가 정격차단전류에 비해서 아주 작으므로 전류 영점 이전에 차단되는 재단현상(Current chopping)이 발생

하며 이러한 재단현상이 발생할 때에는 차단되는 전류의 기율기가 급격하게 커지므로 과전압이 발생한다. 이러한 과전압의 크기는 재단된 전류의 기율기 및 차단되는 전류의 크기에 의해서 결정되는 유도 리액턴스(L)에 비례하며, 이 관계는 식-(5), 식-(6)이다. 그리고 동일한 전압과 정격 지상소전류를 가진 경우, 50 Hz의 경우가 60 Hz보다 1.2배 많은 유도 리액턴스가 되므로 50 Hz 대한 성능검증 측면에서 실질적인 결과를 얻을 수 있다.

$$v(t) = [I_0 Z] [\sin(\beta t)] \quad (5)$$

$$V_p = [I_0] \left[ \sqrt{\frac{L}{C}} \right] \quad (6)$$

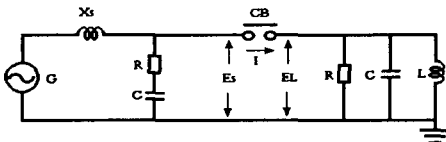
여기서,

$I_0$  : 재단전류 (Chopping current)

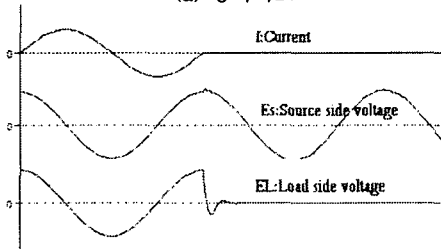
$V_p$  : 과전압 첨두치

$Z = \sqrt{\frac{L}{C}}$  : 특성 임피던스(Surge impedance)

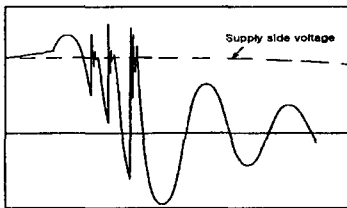
$\beta = \frac{1}{\sqrt{LC}}$  : 고유 각주파수



(a) 등가회로



(b) 전압, 전류 파형



(c) Multiple restrike

그림-4 지상소전류 차단현상

### 3. 결론

최근 전력기기의 개발 동향은 해외 수출 및 원가절감을 위하여 50/60Hz 공용주파수 정격기기를 개발하고 있는 추세다. 따라서 본 논문에서는 전력 계통에서 보호기기로 사용되는 차단기의 상용주파수에 따른 각 시험항목별, 즉 상용주파내전압시험, 온도상승시험, 단시간전류시험, 기본단락투입시험, 진상소전류시험 및 지상소전류개폐시험에 관해서 각 주파수별로 시험의 가혹도를 검토하여 규격에 적합하고 기술적으로 타당성 있는 시험방법을 제시하였다. 그리고 50 Hz 및 60 Hz 공용정격기기에 대해서 전류차단현상과 관련규격에 규정된 사항을 고려하여 일부시험항목을 생략하고 동시에 성능검증을 실시할 수 있는 방안을 제시하였다. 그리함으로써 공용정격기기에 대한 성능검증을 원활하게 수행하여 국내기

업의 해외수출을 간접적으로 지원할 수 있게 되었다. 또한 기기의 50 Hz와 60 Hz에 대한 성능검증을 별도로 실시하므로 발생하는 개발비용 소요기간을 단축할 수 있게 되어 국내중전기기의 기술향상 및 신뢰도를 제고할 수 있다.

표 1 : 주파수에 따른 시험항목별 적용방법

시험 항목	시험항목별 적용방법		
	IEC62271-100 IEC60694	IEEE C37.09	STL 62271-100
1 상용주파내전압시험	IEC60060: 45-65Hz	정격주파수±20 %	규정없음
2 온도 상승시험	60Hz의 결과물 50Hz에서 인정	60Hz	2.6배 50 or 60Hz
3 단시간전류 시험	주파수에 따른 성능평가 결과에 주의	2.6배 : 60Hz 2.5배 : 50Hz	2.6배 50 또는 60Hz
4 단락 시험	T10 T30	주의를 요함	50 or 60Hz
	T60 T100s T100a		50 and 60Hz
	T100a (투입)		2.6배 50 or 60Hz
	단상 2선지락		50 and 60Hz
5 근거리선로고장 (L90, L75, L60)			50 and 60Hz
6 탈조(OP1, OP2)			50 or 60Hz
7 진상소전류 개폐시험 (선로, 케이블중전)	60Hz에서 실시할 경우 50Hz인정 반대는 불가	60Hz에서 실시할 경우 50Hz인정 반대는 불가	60Hz에서 실시할 경우 50Hz인정 반대는 불가
8 지상소전류 개폐시험	IEC61233 50 or 60Hz 유효	-	언급없음

(주) 50 or 60Hz : 50 Hz 또는 60 Hz중 한가지 만 실시.  
50 and 60Hz : 50Hz 와 60Hz에서 각각 별도로 실시.

### [참고 문헌]

- [1] International Electrotechnical commission "IEC 62271-100" (2003) : High-voltage alternating current circuit breakers
- [2] International Electrotechnical commission "IEC 60694" (2002) : Common specifications for High-voltage switches standards.
- [3] International Electrotechnical commission "IEC 60517" (1990) : Gas-insulated metal-enclosed switchgear for rated voltages 72.5 kV and above.
- [4] International Electrotechnical commission "IEC 60517" (1992) HIGH-VOLTAGE TEST TECHNIQUES PART: 1 GENERAL DEFINITIONS AND TEST REQUIREMENTS
- [5] 박승재, 김명현, 박병락, 신영준, 고희석, "50Hz 및 60Hz 공용주파수 정격을 가진 개폐기기의 개발시험 방안의 검토", 경남지부 춘계학술대회 논문집
- [6] 정주영, "50/60Hz 공용 정격 차단기 및 개폐기 성능평가 방법", 연구시험업무 국제화에 대비한 연구활동 기반구축, 보고서, pp80-85, 2004.3
- [7] C. H. Flursheim "Power circuit breaker theory and design, second edition" Peter Peregrinus Ltd. (1982)
- [8] Klaus Ragaller "Current interruption in high-voltage networks" PLENUM PRESS, NEW YORK and LONDON (1978)
- [9] Thomas E. and Browne, JR. "Circuit interruption Theory and Techniques" MARCEL DEKKER, INC.