

基于不同标准体系的高压交流断路器50 Hz与60 Hz容量试验分析

IEC、IEEE和GB标准体系都分别规定了高压交流断路器在50 Hz与60 Hz下的容量试验方式及其试验参数。对于短路及开合试验中额定频率50 Hz与60 Hz下的试验程序之间能否相互替代, IEC与IEEE两套标准体系中的解释各有不同。分析与计算了50 Hz与60 Hz两种额定频率下短路及开合试验对标准要求考核目的的影响。计算结果表明与IEC及IEEE中要求一致, 研究内容可以作为对标准的解释与补充。在此基础上, 考虑到合成试验法的特殊性, 提出了一种额定频率50 Hz与60 Hz下的试验程序之间互用的综合方案, 为GB体系补充相关内容提供了理论依据。

吴 超/深圳市鹏能投资控股有限公司试验分公司

0 引言

IEC、IEEE和GB是关于高压交流断路器的标准体系, 对额定值、性能、特征及试验进行了明确规定。标准对高压交流断路器的主要考核目标是确定其能够保护电力系统安全可靠工作, 其次确保了不同断路器在电气及机械方面可以互换, 以使电网可以相互连接。为适应国际贸易发展的需要, 以及使设计、制造和运行的各方面能够及时了解, 积极参与并掌握国际标准的发展动向, 我国标准组织已经开始关注并积极参与IEC及IEEE标准体系的发展及制(修)定工作。

我国电力系统额定频率为50 Hz, 不同于北美等地区的60 Hz。本文以此为切入点, 分析计算短路及开合试验中额定频率50 Hz与60 Hz下的试验参数^[1-6], 并比对两套标准体系中的相关要求, 为断路器生产厂商、第三方认证实验室及电网用户提供清晰的50 Hz/60 Hz频率下试验程序互用方案, 为我国GB体系补充相

关部分内容提供理论依据^[7-8]。

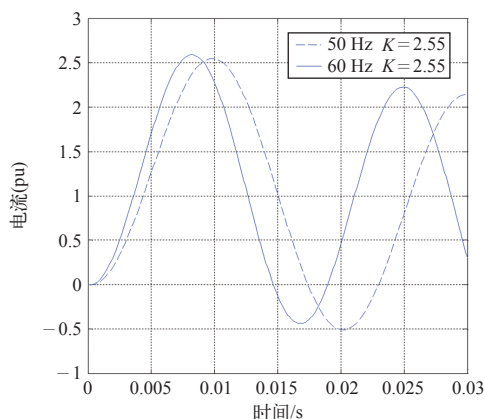
1 峰值耐受电流及短时耐受电流试验

IEC 62271-1及GB T 11022-2011中规定试验应在误差为±10%的额定频率下进行, 为了便于试验, 可能需要更大的额定频率允差, 即如额定频率50 Hz的开关设备和控制设备在60 Hz下试验或反之, 但在解释试验结果时予以注意。

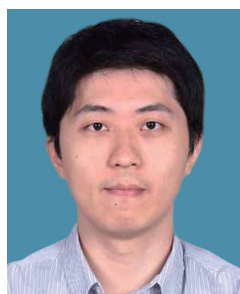
STL导则是对IEC标准的解释和补充, 对此有更为明确的规定, 即峰值电流是交流分量有效值的2.6倍, 在50 Hz或60 Hz电源频率下进行试验。

对于峰值耐受电流及短时耐受电流试验, 频率将影响峰值系数 K 和短路能量 I^2t 两个重要参量, 如图1所示。

通过计算可得50 Hz与60 Hz电源频率下短路能量大小为周期性交替变化, 最大差值为1.4%。峰值系数 K 取2.6可覆盖50 Hz与60 Hz, 此外峰值系数 K 还受直流时间常数影响, 标准直流时间常数为45 ms, IEC与GB中又加入了特殊工况下



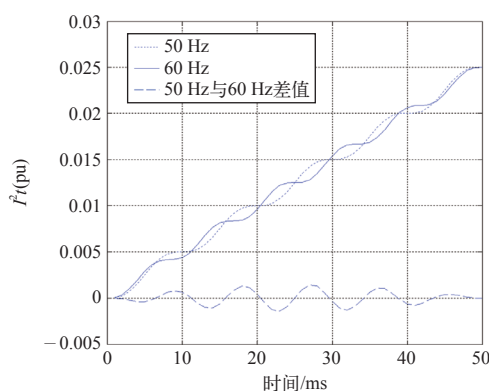
(a) 50 Hz与60 Hz峰值系数对比



吴 超/工程师

关键词/Keywords

短路性能 ·
开合性能 ·
合成试验 ·



(b) 50 Hz与60 Hz短路能量对比

图1 频率对峰值系数和短路能量的影响

的直流时间常数60 ms、75 ms、100 ms和120 ms，峰值系数 K 随直流时间常数变化情况如图2所示，峰值系数 K 统一选取2.7覆盖以上特殊直流时间常数。

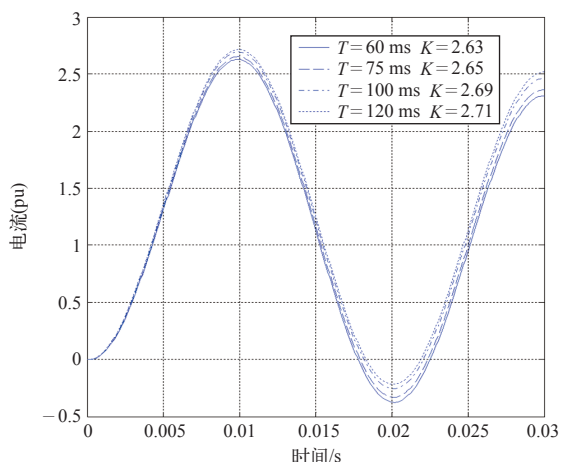


图2 不同直流时间常数对峰值系数的影响

2 短路性能试验

IEEE C37.09规定验证短路性能的试验应该在额定频率下进行。当不在额定频率下试验时，电流零点变化率(di/dt)对某些断路器性能产生强烈影响。如果开断性能不受 di/dt 的强烈影响，则50 Hz和60 Hz电源频率下进行的试验可以相互替代。但遗憾的是IEEE C37标准体系中并没有对 di/dt 的影响作定量分析，因此也未明确给出在50 Hz和60 Hz电源频率下进行短路性能试验是否能够相互替代的细则。

IEC 62271-100及STL导则中关于不同频率下的短路试验要求如表1所示。

表1 标准中有关短路性能试验的频率要求

试验方式	IEC/STL
T10, T30	50 Hz或60 Hz
T60, T100s (或T100s(a+b)), T100a	50 Hz和60 Hz
单相故障, 异相接地故障 (如果相关)	50 Hz或60 Hz
近区故障L90, L75及L60 (如果相关)	50 Hz和60 Hz
失步关合与开断	50 Hz或60 Hz
三相验证试验 ^①	50 Hz或60 Hz ^②
附加电寿命 ^①	50 Hz或60 Hz

① 验证试验及附加试验的主要额定参数受频率影响的分析均在其对应的主试验中进行说明，文中不再单独赘述。

② 相互替代的前提是峰值电流为交流分量有效值的2.6倍。

2.1 基本短路开断

基本短路开断过程中参数通过求解微分方程可得(推导过程略)^[9-10]，仅以单相回路为例，发生基本短路时短路电流表达式为

$$i = I_m \sin(\omega t + \alpha - \theta) - I_m \sin(\alpha - \theta) e^{-t/\tau} \quad (1)$$

开断试验中要求触头刚分点直流分量不大于20% (T100a除外)，电流过零时刻直流分量忽略不计，可得电流零点变化率为

$$di/dt = \omega I_m \quad (2)$$

恢复电压近似表达式为

$$u_c = I_m \omega L (1 - e^{-t/\tau}) \quad (3)$$

电流过零时刻恢复电压上升率

$$RRRV = \frac{du_c}{dt} = I_m \omega Z e^{-t/\tau} \Big|_{t=0} = Z \frac{di}{dt} \quad (4)$$

电流零点变化率将影响瞬态恢复电压 (TRV) 的上升率RRRV。标准中规定，进行直接试验T10和T30时，实验室很难满足较小的峰值时间 t_3 ，标准允许采用实验室所能达到的最小值，但不应小于规定值。因此，试验方式T10和T30时可以忽略 di/dt 对开断性能的影响。

2.2 单相故障和异相接地故障

异相接地故障与T100s相比，电流为额定短路开断电流的87%，首开极系数为1，试验电压为线电压 u_r ，其余参数要求与T100s相同。从影响断路器开断的几个重要因素来看，异相接地故障与T100s相比，电弧能量较小，恢复电压上升率RRRV相同。频率的影响已经在T100s时得到考核，没有必要在异相接地故障中重复考核。

2.3 近区故障

近区故障短路（Short Line Fault, SLF）电流较出线端故障小，但由于受线路分布参数的影响，造成短路电流开断后在断路器到短路故障点这段线路上产生高频振荡的锯齿波，叠加在断路器断口上使TRV起始部分上升率非常高，电弧难以熄灭。若不考虑电弧电压影响，电流过零时电弧熄灭，锯齿波正好到达峰值，即

$$u_L = K \left(1 - \frac{I_L}{I_{SC}} \right) \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} u_r \quad (5)$$

式中， K 为峰值系数，取1.6； I_L 为近区故障开断电流； I_{SC} 为额定短路电流； u_r 为额定电压。

线路侧瞬态电压 u_L 的上升率为

$$RRRV_L = Z \frac{di_L}{dt} = \sqrt{2} \omega I_L Z \times 10^{-6} \quad (6)$$

由式（5）与式（6）可以看出，决定TRV起始阶段波形的锯齿波上升率 $RRRV_L$ 受电流零点变化率 di_L/dt 的直接影响。

2.4 失步故障

失步故障仅是作为电力系统联络用的断路器会遇到，额定失步开断电流为额定短路开断电流的25%，TRV为断路器两端电力系统解列后相互叠加而产生。根据IEC要求，TRV波形为过阻尼的四参数法表示，实际上，TRV波形取决于系统联络断路器在两套电力系统中的安装位置，断路器开断失步故障后两套系统分别在断路器两端独立产生不同频率的瞬态电压，因此波形可以是过阻尼、欠阻尼或者两者的混合。表2为550 kV断路器出线端故障与失步故障预期瞬态恢复电压标准值。由此可以看出，与出线端故障TRV参数相比，失步故

障TRV具有最高的恢复电压峰值和最低的恢复电压上升率，其波形如图3所示。因此电源频率50 Hz和60 Hz的影响可以忽略不计。

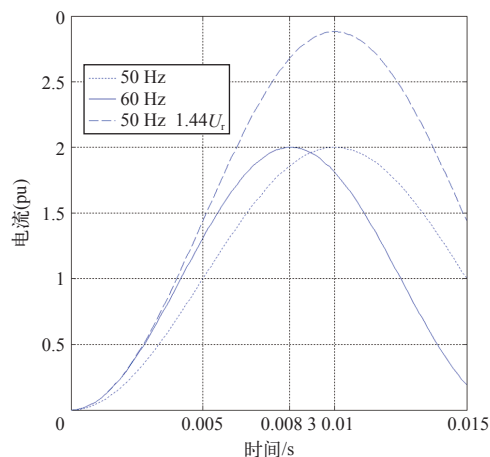


图3 550 kV断路器出线端故障与失步故障TRV波形

3 容性电流开合性能

容性电流开合时，由于容性电流值通常较小，电弧能量及电流零点变化率 di/dt 对产品开断性能影响忽略不计，主要考核的是在开距很小的情况下，尤其是短燃弧时，断口能否承受以 $1 - \cos \omega t$ 变化的工频恢复电压。

IEC 62271-100与IEEE C37.09中对容性电流开合试验时试验回路的频率要求基本保持一致：用额定频率60 Hz来进行证明断路器容性电流开合能力的试验。如果试验不在该频率进行（如50 Hz），断路器承受的电压在最初8.3 ms不低于60 Hz时的额定电压，则50 Hz下的试验可以考虑证明60 Hz的特性。如果在8.3 ms后出现重击穿，由于瞬时电压高于60 Hz时的电压，所以，该试验方式在60 Hz时要重做。

表2 550 kV断路器出线端故障与失步故障预期瞬态恢复电压标准值

额定电压 u_r/kV	试验方式	首开极 系数	振幅系数	第一参考 电压 u_1/kV	时间 t_1 / μs	TRV峰值 u_c / kV	时间 t_2 或 t_3 / μs	时延 $t_d/\mu\text{s}$	电压 u'/kV	时间 $t'/\mu\text{s}$	上升率 $u_1/t_1, u_c/t_3$ /($\text{kV}/\mu\text{s}$)
550	T100	1.3	1.4	438	219	817	876	2~61	219	111~170	2.0
	T60	1.3	1.5	438	146	876	878	2~44	219	75~117	3.0
	T30	1.3	1.53	—	—	893	179	27	298	87	5.0
	T10	1.3	0.9×1.7	—	—	893	128	19	298	62	7.0
	OP1-OP2	5	1.25	674	438	1123	876~1752	2~44	337	221~263	1.54

在不添加任何辅助回路的情况下, 为提高8.3 ms前的工频恢复电压上升陡度, 必须使试验电压达到1.44倍以上, 如图4所示。这样造成试验条件偏严酷, 是被试厂家无法接受的。

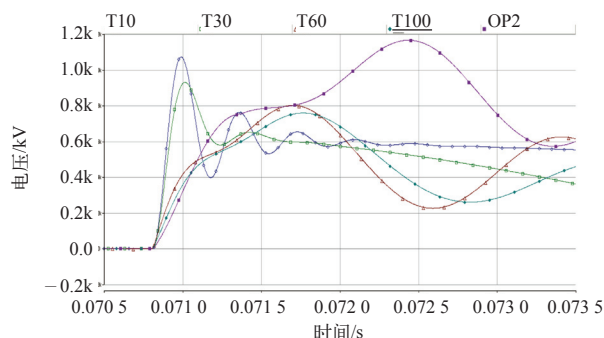


图4 容性电流开合工频恢复电压波形

4 结束语

综合以上分析, 采用50 Hz与60 Hz两种电源频率进行容量试验时, 可以得出以下结论:

1) 对T60、T100和SLF试验参数有严重影响, 需在50 Hz与60 Hz两种电源频率下分别进行。

2) 对T10、T30、单相故障、异相接地故障和失步故障的影响忽略不计, 50 Hz与60 Hz两种电源频率下进行的试验可以相互替代。

3) 峰值耐受电流及短时耐受电流试验时, 峰值电流达到交流分量有效值的2.6倍, 50 Hz与60 Hz两种电源频率下进行的试验可以相互替代, 峰值系数 K 取2.7时覆盖特殊直流时间常数。

4) 容性电流开合试验时, 工频恢复电压在8.3 ms内不低于60 Hz时的电压, 则两种电源频率下进行的试验可以相互替代。但分析表明, 在不增加辅助回路的前提下, 单纯依靠提高试验电压需要至少增加44%才能满足上述要求, 需要标准提出更加科学合理的替代方法。

用合成试验回路进行试验时, 由于电流源与电压源相互独立, 可以在电流源回路提供短路电流时选择任意的燃弧时间, 也可以单独调节电压

源回路引入电流的 di/dt 。因此, 如果按照60 Hz额定频率的要求调节 di/dt , 则在50 Hz下进行的试验对于60 Hz依然有效; 如果涵盖了50 Hz对应的燃弧窗口, 在60 Hz下进行的试验对于50 Hz依然有效。

参考文献

- [1] 张猛, 穆双录, 南振乐. 关于50 Hz与60 Hz高压气体绝缘开关设备互用的探讨 [J]. 高压电器, 2012, 48 (9): 92-98.
- [2] 邱军, 王超, 梁永春. 50 Hz和60 Hz电源对电器温升试验影响的研究 [J]. 电气开关, 2015 (3): 106-108.
- [3] 张春峰, 孙中凯, 张岩. 50 Hz/60 Hz频率互换对不同电气元件的影响 [J]. 电站系统工程, 2014, 30 (2): 79-80.
- [4] 王晋根. 关于50 Hz高压电器兼用于60 Hz电网的有关技术问题探讨 [J]. 高压电器, 2000, 36 (5): 22-25.
- [5] 付松卜, 赵芳. 国产断路器用于60 Hz电网中技术问题的分析 [J]. 高压电器, 2010, 46 (4): 81-83.
- [6] 姚永其. 浅谈电网频率50 Hz与60 Hz对于高压开关型式试验项目区别 [J]. 山东工业技术, 2013 (8): 65-67.
- [7] 全国高压开关设备标准化技术委员会 (SAC/TC 65). GB 1984—2014 高压交流断路器 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [8] 全国高压开关设备标准化技术委员会 (SAC/TC 65). GB/T 4473—2008 高压交流断路器的合成试验 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [9] 徐国政, 张节容, 钱家骊, 黄瑜琰. 高压断路器 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [10] 张冠生. 电器理论基础 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.

(收稿日期: 2018-03-04) EA

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告