

[断路器]

交流断路器低频开断等效试验方法设计与实施

文/冯 伦 何 冰 黄 实 宇文博 彭建飞
西安高压电器研究院股份有限公司

断路器开断低频率电流的工况日益增加，目前包括中远距离海上风电低频输电线路用高压交流开关设备、发电机保护断路器及直流换流站阀侧断路器等均对大容量低频开断能力提出要求。然而国内外大多数用于大容量试验的短路发电机运行频率为50 Hz/60 Hz，因此，研究适合低频条件下的等效短路试验具有重要的现实意义。

为了实现碳达峰、碳中和目标，电力装备转型升级加快，新能源输配电领域快速发展。由于海上风能资源比陆地上丰富，风速相比陆地上大，近年来越来越多的海上风电场投入建设。海上风电场主要传输设备为海底电缆，在工频50 Hz下的合理输电距离大约为80 km，如果海上风电场的离岸距离超过80 km，采用低频输电可以降低电缆的并联电容效应，进一步扩展海上交流输电的距离。

现实情况使得断路器开断低频率电流的工况日益增加，目前包括中远距离海上风电低频输电线路用高压交流开关设备、发电机保护断路器及直流换流站阀侧断路器等均对大容量低频开断能力提出要求。断路器的低频容量试验指采用大功率电源模拟电力系统考核低频情况下关键部件开断与关合能力和承受高电压、大电流能力的试验，该类型试验有效验证了在其特殊工况下的开断性能。然而国内外大多数用于容量试验的核心设备短路发电机的运行频率为50 Hz/60 Hz，不具备16.67~20 Hz低频试验能力。因此，研究适合低频条件下的等效短路试验具有重要意义。

基于模拟发电机在低频运行时可能发生的短路故障，针对发电机保护断路器在20 Hz下的短路开断试验能力不足的情况，设计一种在较高频率下的

等效合成试验方法，采用能量等效和过零点斜率及恢复电压的考核，间接验证实际低频工况的开断性能。进一步搭建PSCAD仿真回路并进行分析，最终采用短路发电机系统及振荡回路系统进行等效合成试验，验证该试验方法的可行性。

等效试验

1. 合成试验原理

根据国家标准GB/T 4473—2018《高压交流短路器的合成试验》，合成试验方法指用两套电源模拟断路器所承受的电气负载，即大电流电源用于在大电流阶段提供低电压下的大电流；高压电源用于在高电压阶段以相对较小容量提供高电压。该方法的基本前提是断路器所承受的工况与直接试验方法中的工况同样严酷。目前已获得广泛认可的是合成试验方法在短路试验方面可实现高度等价性。具体原理是电流源短路电流在电流零点前几百微秒时，电压源系统提供幅值很小且频率较高的电流，并叠加到被试断路器上，使得被试断路器中电流零点的出现滞后于辅助开关，在试品电流零点前辅助开关就将两个电源分开，将发电机系统和振荡回路系统隔离。同时，在被试断路器开断时已经接入电压回路，通过断路器的电流以满足要求的 di/dt 过零。

20 Hz及以下频率的短路电流对比于工频电流，其周波时间是工频周波的数倍，如图1所示。断路器的开断原理为：要求断路器在预期的燃弧时间内能够有效开断，否则延后到下一个低频电流半波，增加25 ms以上的燃弧时间将会给试验带来巨大风险。在这种条件下合成试验方法的优势较为突出，通过辅助开关在预期零点将电流源电流切断，可以保护试验回路及试品，避免燃弧时间过长的潜在危险。

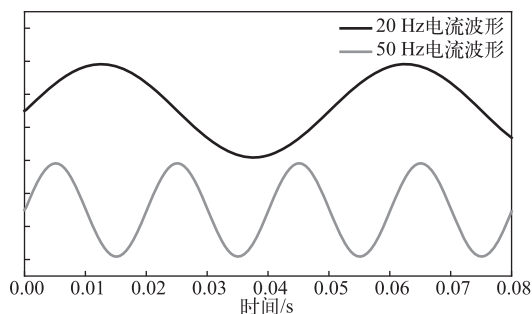


图1 20 Hz与50 Hz电流波形对比图

2. 能量等效法

断路器开断过程中，触头到达刚分点后开始进行燃弧，如图2所示，燃弧时间为 t_{arc} ，在该时间内燃弧能量 $E=I^2 \Delta t$ ，即燃弧时间内电流二次方的积分。燃弧能量是决定断路器能否正常开断的重要参数，采用能量等效法，使20 Hz下低频短路开断试验的燃弧能量与满足实验室发电机允许的任意频率在相同燃弧时间下的燃弧能量相等，同时保证开断时电流零点斜率和TRV与20 Hz下参数相同，因此认为低频开断的物理过程能够等效替代。以40 Hz的发电机允许频率为例，推导能量等效方法如下。

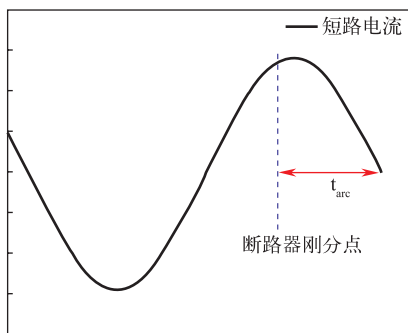


图2 开断过程燃弧示意图

20 Hz下对称电流波形的表达式为

$$i_1(t) = I_m \sin(\omega t + \alpha - \varphi) \quad (1)$$

式中， I_m 为短路电流交流分量的幅值； ω 为20 Hz角频率； α 为短路发生瞬间的相角； φ 为功率因数角。

由式(1)可得20 Hz下的燃弧能量为

$$E_1 = \int_{t_1}^{t_2} i_1^2(t) dt \quad (2)$$

式中， t_1 为断路器刚分点的时间； t_2 为断路器熄弧零点的时间。

40 Hz下非对称电流波形的表达式为

$$i_2(t) = I_m' \sin(\omega' t + \alpha' - \varphi') - I_m' \sin(\alpha' - \varphi') e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (3)$$

式中， ω' 为40 Hz角频率； τ 为时间常数。

由式(3)可得40 Hz下的燃弧能量为

$$E_2 = \int_{t_1}^{t_2} i_2^2(t) dt \quad (4)$$

所求得 E_1 与 E_2 相等，证明不同频率下的燃弧能量可等效替代。

试验设计

1. 试验回路

已知被试发电机断路器在20 Hz下的试验电压为

$$\frac{24 \text{ kV}}{50 \text{ Hz}/20 \text{ Hz}} = 9.6 \text{ kV} \quad (5)$$

试验电流为60 kA，被试断路器具体试验参数见表1。基于以上能量等效计算，实验室发电机允许的任意频率下，选取实验室短路发电机最低工作频率40 Hz，设计了一种替代20 Hz的合成法短路开断试验，等效试验回路如图3所示。图3中，AC采用三相短路发电机作为电流源，电阻 R 和电抗 L 调节试验中短路电流的大小，三相的高精度合闸开关HK控制短路电流的引入相位，通过调节电流源直流分量及改变电流有效值，提供一个半波周期为25 ms的非对称电流波形，使其与20 Hz时的电流波形等效。电压源通过预充电电容 C_s 和电感 L 构成振荡回路，在电流源电流快要过零时刻，时序控制点火间隙Gp放电，为试验回路提供频率为20 Hz的过零点电流及试验所要求的TRV恢复电压，保证试品开断时 di/dt 及恢复电压达到试验参数要求。

表1 发电机断路器低频开断试验参数表

开断类别	额定电压/kV	试验电流/kA	频率/Hz	20 Hz 额定电压/kV	试验电压/kV	TRV峰值电压/kV	RRRV kV/ μ s	时间 t_3 / μ s	时延 t_d / μ s
首开极	24	60	20	9.6	8.3	17.6	0.7	24.5	0.5
后开极	24	60	20	9.6	5.5	10.2	0.5	20.2	0.5

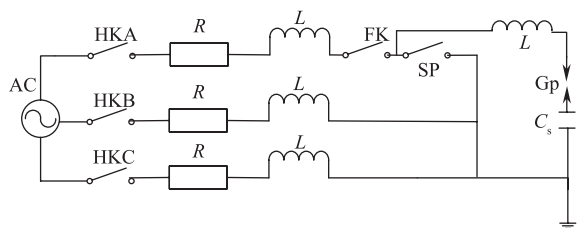


图3 试验回路原理图

2. 仿真分析

依据上述设计的等效试验回路，采用PSCAD搭建仿真模型。按照实验室设备的具体参数搭建了20 Hz试验回路与设计的40 Hz等效试验回路，产生40 Hz下的非对称短路电流，并与20 Hz下要求的试验电流进行比对，仿真波形图如图4所示，两者第一个电流半波峰值相同，半波持续时间都为25 ms，若在第一个半波内取相同的燃弧时间，从图4中的面积可知燃弧能量也基本相同，可以满足试验等效替代的要求。

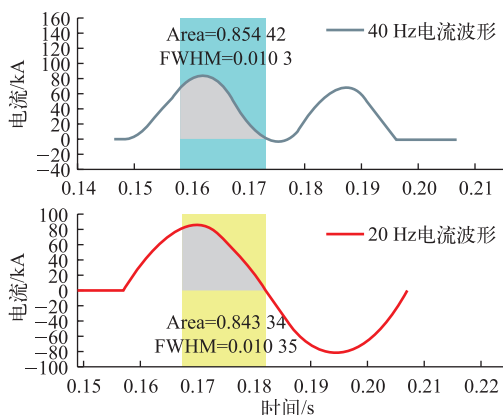


图4 仿真电流波形对比

试验实施

低频开断试验可通过首开极对称电流及非对称电流开断、后开极对称电流及非对称电流开断以充分验证断路器的开断性能，按照上述的试验回路搭建试验平台并进行短路开断试验。

1. 首开极对称电流开断

发电机断路器20 Hz下试验电流为60 kA，在对称电流情况下其半波峰值为84.8 kA，预期的燃弧时间为12 ms开断时，根据上述公式计算得出其燃弧能量为40.9 kA²·s。采用能量等效法进行试验，在频率40 Hz下，将直流分量抬升至98%，获得非对称电流，提高的电流峰值为92.6 kA，试验示波图如图5所示，

燃弧时间11.9 ms下对应的燃弧能量为54.9 kA²·s，大于20 Hz预期的燃弧能量，振荡回路电压源提供的电流过零点斜率di/dt为11.8 A/μs，TRV峰值为19.4 kV，满足对应的试验参数要求。

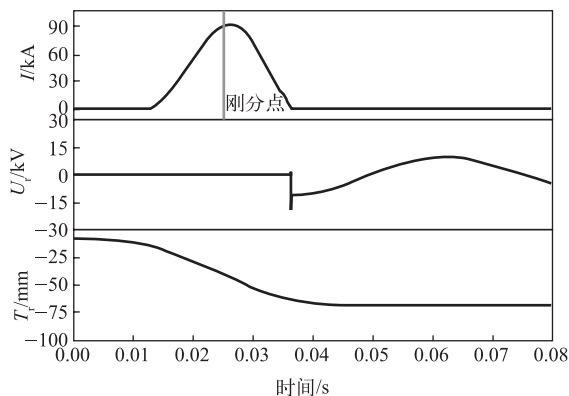


图5 首开极对称电流试验波形图

2. 首开极非对称电流开断

此条件下和对称电流的有效值相同，但非对称情况下其半波峰值为133 kA，预期的燃弧时间为13.8 ms，开断时得出其燃弧能量为99.2 kA²·s。采用相同的方法，在频率40 Hz下，将直流分量抬升至95%，获得非对称电流，提高的电流峰值为124 kA，试验示波图如图6所示，与预期燃弧时间相同，对应的燃弧能量为113 kA²·s，同样大于20 Hz预期的燃弧能量。非对称开断情况下di/dt和TRV的预期参数是成比例降低的，实测出di/dt为9.3 A/μs，TRV峰值为16.6 kV。

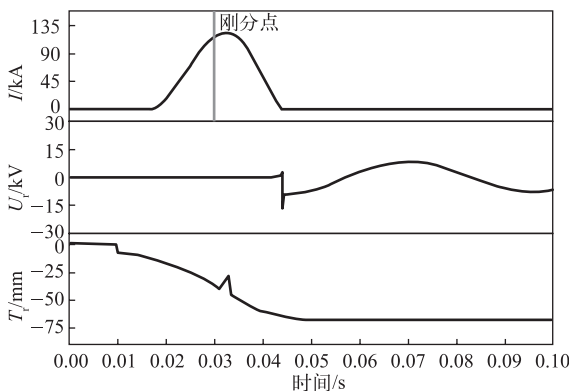


图6 首开极非对称电流试验波形图

3. 后开极对称电流开断

后开极与首开极相比有燃弧时间长的特点，相对试验难度也随之增大。20 Hz下试验电流60 kA的后开极对称电流半波峰值与首开极相同，但预期的

燃弧时间为23.6 ms，所对应的燃弧能量远大于首开极，为 $89.8 \text{ kA}^2\cdot\text{s}$ 。同样采用能量等效法进行试验，在频率40 Hz下，将直流分量抬升至95%，获得非对称电流峰值95.1 kA，如图7所示在此电流波形燃弧时间不变的情况下，燃弧能量为 $98.8 \text{ kA}^2\cdot\text{s}$ ，电压源提供的 di/dt 为 $9.3 \text{ A}/\mu\text{s}$ ，TRV峰值为16.5 kV。

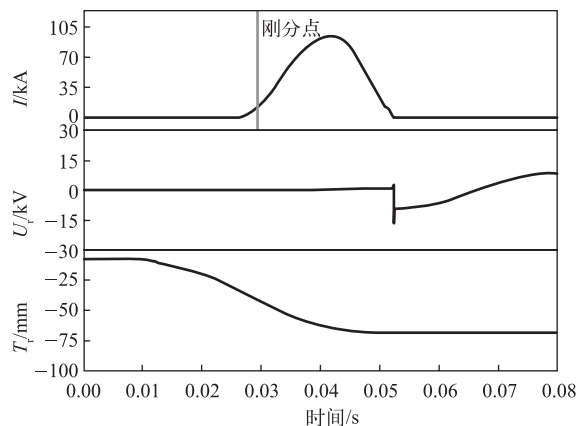


图7 后开极对称电流试验波形图

4. 后开极非对称电流开断

后开极的非对称电流峰值为118 kA，在20 Hz下燃弧时间达到30.4 ms，所需的预期燃弧能量为 $242 \text{ kA}^2\cdot\text{s}$ 。等效至40 Hz波形下，提升直流分量已不能够使半波时间达到30 ms以上，因此设计采用多个电流半波，如图8所示，使正半波与负半波能量叠加达到20 Hz的能量，第一个电流半波峰值为176 kA。断路器开断拉弧过程中，超长的燃弧时间下电弧产生的弧阻增大，使实际试验中电流的半波峰值降低，相应的燃弧能量也降低为 $206 \text{ kA}^2\cdot\text{s}$ ，预期燃弧能量满足20 Hz参数要求。电压源参数按后开极， di/dt 为 $9.3 \text{ A}/\mu\text{s}$ ，TRV峰值为15.7 kV。

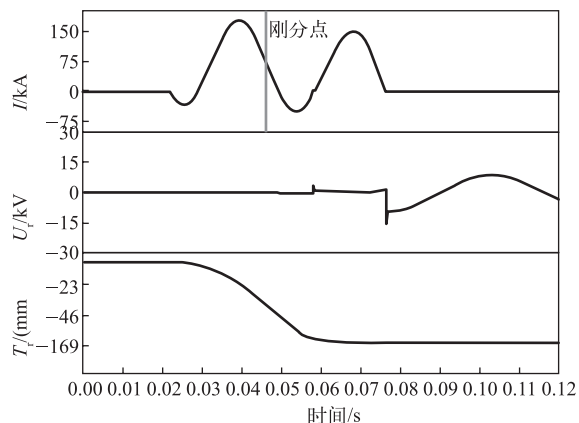


图8 后开级非对称电流试验波形图

依据以上的具体试验，试验参数汇总见表2。

经对比分析，首开极对称电流和后开极对称电流开断，在40 Hz下的等效试验参数略高于20 Hz下的预期参数，首开极非对称电流和后开极非对称电流在40 Hz下的等效试验参数与20 Hz下的预期参数基本持平。综上，文中发电机保护断路器低频情况下的开断性能已通过等效试验验证。

表2 等效试验参数汇总

试验项	20 Hz下 预期半 波峰值/ kA	40 Hz下 等效试验 半波峰值 /kA	20 Hz下 预期燃 弧能量/ $\text{kA}^2\cdot\text{s}$	40 Hz下 等效试验 燃弧能量/ $\text{kA}^2\cdot\text{s}$
首开极对称电流	84.8	92.6	40.9	54.9
首开极非对称电流	133	124	99.2	113
后开极对称电流	84.8	95.1	89.8	98.8
后开极非对称电流	118	176	242	206

结束语

在国内外大多数容量实验室无法进行低频试验的前提下，以模拟发电机在低频运行时可能发生的短路故障为例，提出一种采用燃弧能量等效的合成试验方法。首先通过公式推导提供了该方法的理论依据；然后设计试验回路并搭建PSCAD仿真平台，进行燃弧能量等效分析；最终以40 Hz为例，采用短路发电系统及振荡回路系统完成首开极对称电流及非对称电流开断、后开极对称电流及非对称电流开断，验证该试验方法的可行性。该试验方法的有效实施，可解决因试验电源频率不足导致的试验无法实施的问题，为新能源低频输电试验研究提供参考。EA

(收稿日期：2022-11-10)

参考文献

- [1] 冯迎春，杨晓滨，任众楷．基于故障录波的交流断路器燃弧故障检测方法有效性评估[J]．电气应用，2021，40(7)：93-97．
- [2] 谭振龙，张伶俐，陈希，等．远海大容量机组海上风电集电系统技术经济研究[J]．电气应用，2021，40(6)：64-71．
- [3] 牟金善．一种海上风电机组变流器共模电流干扰的抑制方法[J]．电气应用，2021，40(5)：76-81，106．