

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.09.039

IEC 62271-101:2017 附录A 畸变电流公式分析与讨论

孙海波, 杜 炜

(西安高压电器研究院有限责任公司, 西安 710077)

摘要: 高压交流断路器合成试验标准《IEC 62271-101:2017 高压开关设备和控制设备—第101部分:合成试验》附录A中论述了断路器在开断短路电流时,大电流阶段的畸变电流产生机理及表达式。文中应用线性电流叠加原理,理论上推导了电弧电压为恒值和线性增长时大电流阶段的畸变电流计算公式,并与IEC标准中给出的公式进行了对比分析,结果表明:电弧电压恒定时畸变电流的计算公式与IEC标准一致,电弧电压线性增长时IEC标准中畸变电流计算公式存在问题需要进行修正。文中的研究内容为大容量试验站执行合成试验时畸变电流的评估与计算提供了参考与依据。

关键词: 合成试验; 电弧电压; 大电流阶段; 电流畸变

Analysis and Discussion of the Distortion Current Formula in Appendix A of IEC 62271-101:2017

SUN Haibo, DU Wei

(Xi'an High Voltage Apparatus Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

Abstract: In the case of circuit-breakers breaking the short-circuit current the mechanism and formulas of distortion current in high-current interval are discussed in appendix A of IEC 62271-101:2017 high-voltage switchgear and controlgear-Part 101:Synthetic testing. By applying the superposition principle of linear current, this paper theoretically deduced the distortion current formulas in high-current interval with constant arc voltage and linearly rising arc voltage, and compares it with the formulas given in the IEC standard. The results show that the distortion current formulas of this paper is the same as the IEC standard when the arc voltage is constant, but the distortion current formulas of the IEC standard are in problem and need to be amended when the arc voltage is linearly rising. The research contents of this paper provide reference and basis for the evaluation and calculation current distortion of synthetic test in high power station.

Key words: synthetic test; arc voltage; high-current interval; current distortion

0 引言

高压交流断路器在电力系统中起着开断短路故障和切除负载的重要作用,断路器开断短路故障和切除负载的能力需要在投入工程运行之前得到验证。对于特高压断路器由于试验要求的容量很大,采用直接试验的方式无法满足试验需求,因此合成试验成为了有效考核特高压断路器短路关合和开断能力,以及负载开合能力的有效手段^[1-7]。

依据高压交流断路器合成试验标准《IEC 62271-101:2017 高压开关设备和控制设备—第101部分:合成试验》,高压断路器短路电流开断过程可以分为大电流阶段、相互作用阶段和高电压阶段^[8-9]。在大电流阶段,电弧电压相对变化稳定,通过回路的电抗产生感性的畸变电流影响短路电流的半波幅值和半波持续时间;在相互作用,电流趋零使电弧电压开始显著变化,电弧电压对回路的并联电容进行充放电产生容性的畸变电流影响电流过零前

的波形和 di/dt [10-11]。实际上, 畸变电流使实际电流偏离预期电流, 且主要流过实际回路所有参数中具有小的时间常数的阻抗。

高压断路器的燃弧过程主要发生在大电流阶段, 在电流引入法和电压引入法的合成试验回路中, 以短路发电机作为电流源, 在开断过程的大电流阶段电弧电压大约是发电机电压的 6%~10% [3, 12]。电弧电压将导致预期电流的畸变, 在评价电弧电压所产生的畸变电流对预期电流的影响时, 仅考虑半波幅值和半波持续时间通常是足够的。文中从理论上推导了电弧电压为恒值和线性增长时大电流阶段的畸变电流计算公式, 指出了《IEC 62271-101:2017 高压开关设备和控制设备—第 101 部分: 合成试验》附录 A 在电弧电压线性增长时畸变电流计算公式存在的问题, 并计划将文中的结论提交给 IEC 标准工作组。文中的研究内容为大容量合成试验时畸变电流的评估与计算提供了参考与依据。

1 大电流阶段畸变电流产生机理

以电流引入法或电压引入法的合成试验回路 [3, 8-9, 13-15], 在短路电流开断前施加于高压断路器电源主要是合验试验回路电流源部分, 电流源部分的电路见图 1。图 1 中: u_s 为电流源电压; L 为试验回路的调节电抗; R 为试验回路的电阻; C 为电源回路的并联等效电容; T_o 为被试断路器; u_a 为被试断路器燃弧期间的电弧电压。

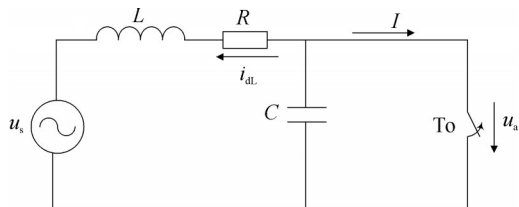


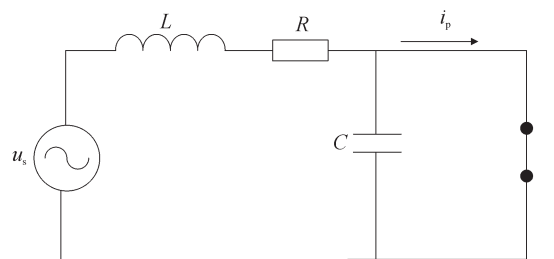
图 1 合成试验回路电流源部分

Fig. 1 Current source part of synthetic test circuit

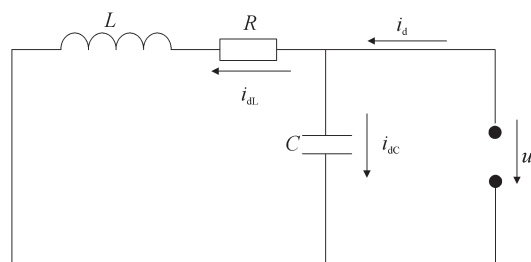
根据线性电路叠加原理, 图 1 的电路可以等效为电流源电压 u_s 和电弧电压 u_a 单独激励的两个电路相叠加。电流源电压 u_s 单独激励时提供预期短路电流 i_p , 其等效电路见图 2(a); 电弧电压 u_a 单独激励时产生畸变电流 i_d , 其等效电路见图 2(b)。应用基尔霍夫电压定律和电流定律可以得到以下方程 [16]

$$\begin{cases} u_a = L \frac{di_{dL}}{dt} + Ri_{dL} \\ u_a = \frac{1}{C} \int i_{dc} dt \\ u_s = L \frac{di_p}{dt} + Ri_p \\ i = i_p - i_{dL} - i_{dc} \end{cases} \quad (1)$$

在图 2(b)中, 当电弧电压单独作用时, 畸变电流



(a) 预期电流等效电路



(b) 畸变电流等效电路

图 2 等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit

i_d 将分别流过线路上的电容和电感, 产生感性的畸变电流 i_{dL} 和容性的畸变电流 i_{dc} 。忽略电流源回路电阻, 由电弧电压和线路参数可以得出畸变电流的表达式为

$$i_d = i_{dL} + i_{dc} = \frac{1}{L} \int u_a dt + C \frac{du_a}{dt} \quad (2)$$

事实上, 图 1 中电容支路的容抗值要比电感支路的感抗值大很多, 在具体计算时可以忽略容性畸变电流 i_{dc} 。一般特高压断路器的燃弧时间在 3 个半波以内, 因此下面只计算电流零前 3 个半波上的畸变电流。燃弧时间超过一个半波时, 电弧电压作用的时间较长, 需要考虑图 2(b) 中电流源回路电阻 R 对畸变电流的影响, 可得到畸变电流 i_d 的一阶电路方程

$$u_a = L \frac{di_d}{dt} + Ri_d \quad (3)$$

2 大电流阶段畸变电流表达式推导与计算

考虑到一般特高压断路器的燃弧时间在 3 个半波以内, 因此下面将推导与计算前 3 个半波的畸变电流计算公式。当燃弧时间大于 3 个半波时, 获得更多半波的畸变电流计算公式可以按照下述的计算方法进行推导。

为了计算的方便, 定义恒定电弧电压 $u_a = U_a$, 线性增长的电弧电压 $u_a = St$ (S 为电弧电压的增长速率, 为一定值参数), 触头分离时刻为 t_{cs} , 第 1 个燃弧半波终止时刻为 t_1 ; 第 2 个燃弧半波终止时刻为 t_2 ; 第 3 个燃弧半波终止时刻为 t_3 。

2.1 电弧电压恒定

2.1.1 第1个燃弧半波上的畸变电流

电弧电压为 $u_a = U_a \varepsilon(t - t_{cs})$, $\varepsilon(t)$ 为阶跃函数, 由式(3)可求解得到第1个半波的畸变电流表达式 $i_d(\text{p.u.})$ 为

$$i_d = \frac{U_a \left(1 - e^{-(t-t_{cs})/\tau}\right) / R}{\sqrt{2}U / \sqrt{(\omega L)^2 + R^2}} = \frac{U_a}{\sqrt{2}U \cos \varphi} \left(1 - e^{-(t-t_{cs})/\tau}\right) \quad t_1 \geq t \geq t_{cs} \quad (4)$$

2.1.2 第2个燃弧半波上的畸变电流

电弧电压为 $u_a = U_a [\varepsilon(t - t_{cs}) - 2\varepsilon(t - t_1)]$, 由式(3)可求解得到第2个半波的畸变电流 $i_d(\text{p.u.})$ 表达式为

$$i_d = \frac{U_a}{\sqrt{2}U \cos \varphi} \left[\left(1 - e^{-(t-t_{cs})/\tau}\right) - 2 \left(1 - e^{-(t-t_1)/\tau}\right) \right] \quad t_2 \geq t \geq t_1 \quad (5)$$

2.1.3 第3个燃弧半波上的畸变电流

电弧电压为 $u_a = U_a [\varepsilon(t - t_{cs}) - 2\varepsilon(t - t_1) + 2\varepsilon(t - t_2)]$, 由式(3)可求解得到第3个半波的畸变电流 $i_d(\text{p.u.})$ 表达式为

$$i_d = \frac{U_a}{\sqrt{2}U \cos \varphi} \left[\left(1 - e^{-(t-t_{cs})/\tau}\right) - 2 \left(1 - e^{-(t-t_1)/\tau}\right) + 2 \left(1 - e^{-(t-t_2)/\tau}\right) \right] \quad t_3 \geq t \geq t_2 \quad (6)$$

2.2 电弧电压线性增长

2.2.1 第一个燃弧半波上的畸变电流

电弧电压为 $u_a = S\varepsilon(t - t_{cs})t$, 代入式(3), 即有

$$\frac{di_d}{dt} + \frac{R}{L}i_d = \frac{S}{L}t \quad (7)$$

式(7)为一阶线性微分方程, 令 $P(t) = R/L$, $Q(t) = St/L$, 可求的通解为

$$i_d = Ce^{-\int P(t)dt} + e^{-\int P(t)dt} \int Q(t)e^{\int P(t)dt} dt \quad (8)$$

代入初始条件 $i_d = 0$, 可得到 $i_d(\text{p.u.})$ 定解为

$$i_d = \frac{\left(e^{-(t-t_{cs})/\tau} - 1\right)SL / R^2 + S(t - t_{cs}) / R}{\sqrt{2}U / \sqrt{(\omega L)^2 + R^2}} = \frac{S}{\sqrt{2}U \cos \varphi} \left[(t - t_{cs}) - \frac{L}{R} \left(1 - e^{-(t-t_{cs})/\tau}\right) \right] \quad t_1 \geq t \geq t_{cs} \quad (9)$$

2.2.2 第2个燃弧半波上的畸变电流

电弧电压为 $u_a = St[\varepsilon(t - t_{cs}) - 2\varepsilon(t - t_1)]$, 由式(3)可求解得到第2个半波的畸变电流 $i_d(\text{p.u.})$ 表达式为

$$i_d = \frac{S}{\sqrt{2}U \cos \varphi} \left\{ (t - t_{cs}) - \frac{L}{R} \left(1 - e^{-(t-t_{cs})/\tau}\right) - 2 \left[(t - t_1) - \frac{L}{R} \left(1 - e^{-(t-t_1)/\tau}\right) \right] \right\} \quad t_2 \geq t \geq t_1 \quad (10)$$

2.2.3 第3个燃弧半波上的畸变电流

电弧电压特性为 $u_a = St[\varepsilon(t - t_{cs}) - 2\varepsilon(t - t_1) + 2\varepsilon(t - t_2)]$, 由式(3)可求解得到第3个半波的畸变电流 $i_d(\text{p.u.})$ 表达式为

$$i_d = \frac{S}{\sqrt{2}U \cos \varphi} \left\{ (t - t_{cs}) - \frac{L}{R} \left(1 - e^{-(t-t_{cs})/\tau}\right) - 2 \left[(t - t_1) - \frac{L}{R} \left(1 - e^{-(t-t_1)/\tau}\right) \right] + 2 \left[(t - t_2) - \frac{L}{R} \left(1 - e^{-(t-t_2)/\tau}\right) \right] \right\} \quad t_3 \geq t \geq t_2 \quad (11)$$

3 合成试验标准《IEC 62271-101:2017 Synthetic testing》附录A畸变电流公式存在的问题

对比分析文中的畸变电流表达式计算结果与《IEC 62271-101:2017 高压开关设备和控制设备—第101部分:合成试验》附录A的畸变电流表达式, 结果表明电弧电压恒定时畸变电流的计算公式与IEC标准一致, 电弧电压线性增长时IEC标准中畸变电流计算公式存在问题。当电弧电压线性增长时, IEC标准中畸变电流公式见表1。

表1 IEC标准中畸变电流公式

Table 1 The distortion current formula in IEC standard

第1个半波	第2个半波	第3个半波
C	D-E	D-F+G

表1中: $C = \frac{M}{\cos \varphi} \left[(t - t_{cs}) - \frac{L}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}(t-t_{cs})}\right) \right]$; $D =$

$\frac{M}{\cos \varphi} \left[(t_1 - t_{cs}) - \frac{L}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}(t_1-t_{cs})}\right) \right] e^{-\frac{R}{L}(t-t_1)}$; $E = \frac{M}{\cos \varphi} \left[(t - t_1) - \frac{L}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}(t-t_1)}\right) + (t_1 - t_{cs}) \left(1 - e^{-\frac{R}{L}(t-t_{cs})}\right) \right]$; $F = \frac{M}{\cos \varphi} \left[(t_2 - t_1) - \frac{L}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}(t_2-t_1)}\right) + (t_1 - t_{cs}) \left(1 - e^{-\frac{R}{L}(t-t_{cs})}\right) \right] e^{-\frac{R}{L}(t-t_2)}$; $G = \frac{M}{\cos \varphi}$

$\left[(t - t_2) - \frac{L}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}(t-t_2)}\right) + (t_2 - t_{cs}) \left(1 - e^{-\frac{R}{L}(t-t_{cs})}\right) \right]$

其中, $M = \frac{ST_a}{2\sqrt{2}U}$, T_a 为实际的燃弧时间。

比较式(9)-(11)与表1对应的每个半波的畸变电流计算公式, 表1中 M 表达式应修正为

$$M = \frac{S}{\sqrt{2}U} \quad (12)$$

由式(12)可知 M 是与燃弧时间无关的一个定值, 而《IEC 62271-101:2017 高压开关设备和控制设

备—第 101 部分:合成试验》附录 A 中给出的 M 是与燃弧时间相关的一个定值。从理论计算上分析,线性增长电弧电压的表达式为 $u_a = St$,代入式(3)的方程进行求解时,解得表达式应该是与燃弧时间 T_a 无关的解析表达式。进一步,当燃弧时间大于一个半波时,第一个半波上的畸变电流表达式应该只与该半波上电弧电压的大小有关,而与实际的燃弧时间无关。

4 结论

文中分析与讨论大电流阶段电流畸变的机理,应用线性电流叠加原理,理论上推导了电弧电压为恒值和线性增长时大电流阶段的畸变电流计算公式。

1)当电弧电压恒定时,文中的研究结论与 IEC 标准一致;

2)当电弧电压线性增长时 IEC 标准中畸变电流计算公式存在问题,并给出了文中的分析结果;

后续文中作者将研究结论提交给 IEC 标准工作组,并提出修正意见。

参考文献:

- [1] 李 刚,高享想,刘浩军,等.高压交流断路器大容量短路开断与关合试验技术[J]. 高压电器,2015,54(2):68-75.
LI Gang, GAO Xiangxiang, LIU Haojun, et al. High power short-circuit breaking and making tests technique of the high voltage AC circuit breakers[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 54(2):68-75.
- [2] 米尔萨德·卡普塔诺维克. 高压断路器理论、设计与试验方法[M]. 闫 静,王建华,译. 北京:机械工业出版社, 2015.
KAPETANOVI M. High voltage circuit breakers[M]. YAN Jing, WANG Jianhua, translation. Beijing:China Machine Press, 2015.
- [3] VAN DER SLUIS L. Transients in power systems[M]. USA: John Wiley & Sons Ltd., 2001.
- [4] 裴振江,何俊佳,姚斯立. 特高压断路器的大容量开断试验等价性分析与开断试验方法[J]. 高压电器, 2009, 49(5):1-5.
PEI Zhengjiang, HE Junjia, YAO Sili. Equivalency analysis and test method of high power test for ultra-high voltage circuit breakers[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 49(5):1-5.
- [5] PEELO D F. Current interruption transients calculation[M]. England: John Wiley and Sons Ltd., 2014.
- [6] 高压交流断路器:GB 1984—2014[S]. 2014.
High-voltage alternating current circuit-breakers:GB 1984—2014[S]. 2014.
- [7] High-voltage switchgear and controlgear—Part 100: High-voltage alternating-current circuit breakers; EC 62271—100:2012[S]. 2012.
- [8] 高压交流断路器的合成试验:GB 4473—2008[S]. 2014.
Synthetic testing of high-voltage alternating current circuit-breakers:GB 4473—2008[S]. 2008.
- [9] High-voltage switchgear and controlgear—Part 101: Synthetic testing: IEC 62271-100:2017[S]. 2017.
- [10] VAN DER SLUIS L, SHENG B L. The influence of the arc voltage in synthetic test circuits[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10(1):274-279.
- [11] SCHAVEMAKER P H, VAN DER SLUIS L. The arc model blockset[C]//Proceedings of the Second IASTED International Conference. Greece:[s.n.], 2002:644-648.
- [12] 王超武,高享想,李 刚,等. 特高压断路器短路开断试验零前电流畸变的仿真及应用[J]. 高压电器, 2016, 52(6):46-49.
WANG Chaowu, GAO Xiangxiang, LI Gang, et al. Application and simulation computations of current zero distortion for UHV circuit-breaker short circuit test[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(6):46-49.
- [13] 裴振江,姚斯立,何俊佳,等. 特高压断路器几种开断试验回路比较[J]. 高压电器, 2006, 42(5):321-323.
PEI Zhengjiang, YAO Sili, HE Junjia, et al. Comparison of several synthetic test circuits for ultra-high voltage circuit breakers[J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(5):321-323.
- [14] SHENG B L, VAN DER SLUIS L. A new synthetic test circuit for ultra-high-voltage circuit breakers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(4):1514-1519.
- [15] SHENG B L, VAN DER SLUIS L. Comparison of synthetic test circuits for ultra-high-voltage circuit breakers[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1996, 11(4): 1810-1815.

孙海波(1981—),男,工程师,硕士,主要从事高压电器产品大容量试验检测及运营计划工作。