

基于改进IEEE算法的发电机出口断路器选型计算

发电机出口断路器价格昂贵，而发电机出口短路电流计算会直接影响断路器选型。对IEC标准及IEEE标准中关于计算发电机出口短路电流的方法进行了介绍，并基于IEEE算法提出了改进算法，增加了3种运行工况下的短路电流计算。结合具体算例对3种方法进行了比较，为GCB选型提出了参考性意见。

王 丽 师法民 张永平/国核电力规划设计研究院

0 引言

发电机出口断路器一般布置在发电机和主变压器之间，装设发电机出口断路器有以下优点：提高了厂用电的可靠性和灵活性；提高了发电机的可靠性；根据实际情况减少起动备用变压器的数量及容量，同时减少了容量电费等。不装设发电机出口断路器（GCB）的主要原因：目前GCB主要依靠进口，价格昂贵且初始投资较大。

国内邹县电厂、北疆电厂和大唐潮州等没有装设GCB。外高桥电厂二期、玉环电厂及泰州电厂装设了GCB；核电厂由于对厂用电可靠性要求较高，因此大亚湾核电、岭澳核电、红沿河核电、台山核电、三门核电及海阳核电均设置了GCB。

由于随着机组容量的不断扩大，对发电机出口断路器开断短路电流水平能力要求不断提高，要求更高参数的发电机出口断路器。目前能够满足大容量机组只有ABB公司和ALSTOM公司产品，价格昂贵。由于开断短路水平能力不

同，不同型号断路器价格相差很大，因此对于发电机出口短路电流水平计算就显得非常重要。

目前，国内外对发电机出口短路电流计算主要有IEC标准、IEEE标准两种算法，本文首先简要介绍这两种算法，通过具体算例，分析差异原因，并针对IEEE算法，提出了改进算法，对如何计算发电机出口短路电流提出建议。

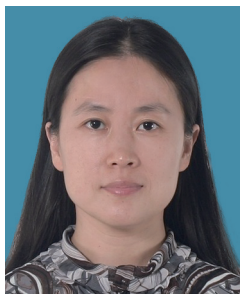
1 短路电流算法的介绍

选择发电机出口断路器主要需要计算发电机源短路电流，包括对称短路电流、短路电流直流分量（非周期分量）和短路电流峰值；系统源短路电流，包括对称短路电流、短路电流直流分量（非周期分量）和短路电流峰值等。

目前，针对发电机出口短路电流计算的相关规程规范主要有IEC 60909—1999、IEEE std C37.013—1997、IEEE std C37.010—1999、GB/T 15544—1995和GB/T 14824—2008。其中GB/T 15544—1995等同于IEC 60909—1999，GB/T 14824—2008 等同于IEEE std C37.013—1997。

1.1 IEC标准发电机出口短路电流算法

基于IEC标准的短路电流计算主要是依据IEC 60909—1999，所有旋转电机（发电机、同步电动机和异步电动机均等同与发电机一样看待），电力系统电源、短路时可瞬时逆变运行的静止换流器装置等，均作为电流源处理，即均作



王 丽/高级工程师

关键词/Keywords

发电机出口断路器（GCB）·
短路电流计算·
IEC算法·
改进IEEE算法·

为网络接线的元件处理。但对稳态短路电流，则同步电动机、异步电动机及静止换流器无影响，即不作为网络元件^[1-2]。

IEC算法中引入等效电压源 $cU_n/\sqrt{3}$ ：为计算正序系统短路电流，而加于短路点的理想电压源。在网络中，等效电压源是唯一的有源电压， c 考虑到电压的变化，不计设备与线路电容、旋转电动机的次暂态特性变化等因素^[2-3]。

(1) 对称短路电流初始值^[2]

$$I_k'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3}\sqrt{R_k^2 + X_k^2}} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_k} \quad (1)$$

式中， I_k'' 为对称短路电流初始值； $cU_n/\sqrt{3}$ 为等效电压源； R_k 为短路电阻； X_k 为短路电抗； Z_k 为短路阻抗。

IEC 60909—1999 对发电机及变压器短路阻抗引入修正系数。

对发电机而言，发电机的校正阻抗为

$$Z_{GPSU} = K_{GPSU} Z_G \quad (2)$$

发电机的校正系数为

$$K_{GPSU} = \frac{C_{\max}}{1 + x_d'' \sin \varphi} \quad (3)$$

对变压器而言，变压器的校正阻抗为

$$Z_{TPSU} = K_{TPSU} Z_{TLV} \quad (4)$$

变压器的校正系数为

$$K_{TPSU} = C_{\max} \quad (5)$$

式中， Z_{GPSU} 为发电机的校正阻抗； Z_{TPSU} 为变压器的校正阻抗； Z_G 为发电机阻抗， $Z_G = R_G + jx_d''$ ； Z_{TLV} 为归算到低压侧的变压器阻抗； x_d'' 为归算到发电机额定阻抗时的发电机超瞬态电抗； φ 为发电机额定电流 I_r 与电压 U_r 间的相角。

(2) 对称开断电流^[2]

IEC标准中对断路器开断时短路电流的计算，依据开断时间的长短，采用不同的公式

$$I_B = \mu I_k'' \quad (6)$$

$$\begin{aligned} t_{\min} &= 0.02 \text{ s} & \mu &= 0.84 + 0.26e^{-0.26 I_{kG}''/I_{rG}} \\ t_{\min} &= 0.05 \text{ s} & \mu &= 0.71 + 0.51e^{-0.30 I_{kG}''/I_{rG}} \\ t_{\min} &= 0.10 \text{ s} & \mu &= 0.62 + 0.72e^{-0.32 I_{kG}''/I_{rG}} \\ t_{\min} &\geq 0.25 \text{ s} & \mu &= 0.56 + 0.94e^{-0.38 I_{kG}''/I_{rG}} \end{aligned} \quad (7)$$

(3) 短路电流峰值^[2]

单电源馈电的短路是串联供电电路，短路电流峰值 I_p 可按下式计算

$$I_p = k\sqrt{2}I_k'' \quad (8)$$

根据要求计算的准确度 k 值算法有3种（具体可参见相关规程），选择IEC 60909 4.3.1.2中提出的方法C^[2]，等效频率 f_c ： $k = k_c$ 。

根据下式计算 R/X 或 X/R ，从IEC 60909中提供的图表（Figure 15）^[2]求取 k_c

$$\frac{R}{X} = \frac{R_c}{X_c} \cdot \frac{f_c}{f} \quad (9)$$

式中， R_c 为阻抗 Z_c 的实数部分，即为从短路点看的等效频率的等效电阻； X_c 为阻抗 Z_c 的虚数部分，即为从短路点看的等效频率的等效电抗。

(4) 短路电流非周期分量^[2]

$$I_{dc}(t) = \sqrt{2}I_k'' e^{-2\pi f t R/X} \quad (10)$$

式中， f 为电力系统标称频率，50 Hz； t 为时间。

1.2 IEEE标准发电机出口短路电流算法

对于发电机出口短路电流计算，IEEE标准中不能概括整个计算过程，主要可依据规范IEEE std C37.010—1999及IEEE std C37.013—1997。IEEE短路电流计算标准，主要为基于全电流整定的断路器提供短路电流的参考值。

(1) 发电机源短路电流

在计算发电机源短路电流时，采用了电机学中较为准确的计算公式，考虑了发电机侧空载状态下短路电流的超瞬态衰减过程及短路电流的瞬态衰减过程^[4]，即

$$\begin{aligned} I_a(t) &= \frac{\sqrt{2}S}{\sqrt{3}U_r} \left\{ \left[\left(\frac{1}{x_d''} - \frac{1}{x_d'} \right) e^{-\frac{t}{T_d'}} + \left(\frac{1}{x_d'} - \frac{1}{x_d} \right) e^{-\frac{t}{T_d}} + \frac{1}{x_d} \right] \cos(\omega t) - \right. \\ &\quad \left. \frac{1}{2} \left(\frac{1}{x_d''} + \frac{1}{x_q''} \right) e^{-\frac{t}{T_a}} - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{x_d''} - \frac{1}{x_q''} \right) e^{-\frac{t}{T_a}} \cos(2\omega t) \right\} \quad (11) \end{aligned}$$

其中交流分量

$$I_b(t) = \frac{\sqrt{2}S}{\sqrt{3}U_r} \left[\left(\frac{1}{x_d''} - \frac{1}{x_d'} \right) e^{-\frac{t}{T_d'}} + \left(\frac{1}{x_d'} - \frac{1}{x_d} \right) e^{-\frac{t}{T_d}} + \frac{1}{x_d} \right] \cos(\omega t) \quad (12)$$

直流分量为

$$I_{dc}(t) = \frac{\sqrt{2}S}{\sqrt{3}U_r} \left[-\frac{u_{|0|}}{2} \left(\frac{1}{x_d''} + \frac{1}{x_q''} \right) \right] e^{-\frac{t}{T_a}} \quad (13)$$

式中, S 为发电机额定输出容量; U_r 为发电机额定电压; x_d'' 为发电机直轴次暂态电抗; x_d' 为发电机直轴暂态电抗; x_d 为发电机直轴电抗; T_a 为发电机电枢绕组时间常数。

(2) 系统源短路电流

IEEE标准通过一个等效电压源 E 与一个等效电抗串联 (均取标么值) 的等效网络, 来简化短路电流的计算。电压源 E 是短路母线上的标称电压, 反映了短路前的电压。IEEE标准对系统各元件等效电抗的取值有着详细的规定, IEEE标准的短路电流计算步骤方法比较简明, 即 $I = KE/X$, 其中 K 由系统中的短路点和从短路点看进去的系统的 X/R 值决定^[5]。

系统源非对称短路电流的直流分量为

$$I_{dc}(t) = (\sqrt{2}I_k'') e^{-t/\tau} \quad (14)$$

式中, τ 为 $\frac{1}{\omega} \cdot \frac{X}{R}$, 其中 ω 为角频率。

2 基于IEEE算法考虑不同工况下发电机源短路电流计算

IEEE std C37.013—1997算法中采用了电机学中较为准确的计算公式, 考虑了短路电流的超瞬态衰减过程及短路电流的瞬态衰减过程。

由于空载工况下, 发电机模型最为简单, 因此IEEE算法仅考虑了空载工况下的模型, 由于机组容量不断扩大, 发电机短路电流不断加大, 选择的发电机断路器开断能力与实际短路电流之间冗余度在缩小, 就需要更准确地计算发电机源短路电流, 需要计算其余工况下短路电流值是否能满足要求。因此需要考虑负载工况下 (超前、滞后及功率因数为1时) 发电机侧短路电流。

在IEEE算法基础上考虑不同工况时, 参考电机学中负载工况下较为准确的计算公式^[6], 短路电流按下式计算

$$I_a(t) = \frac{\sqrt{2}S}{\sqrt{3}U_r} \left\{ \left[\left(\frac{E_{q|0|}''}{x_d''} - \frac{E_{q|0|}'}{x_d'} \right) e^{-\frac{t}{T_d''}} + \left(\frac{E_{q|0|}'}{x_d'} - \frac{E_{q|0|}}{x_d} \right) e^{-\frac{t}{T_d'}} + \frac{E_{q|0|}}{x_d} \right] \right.$$

$$\left. \cos(t + \theta_0) + \left(\frac{E_{d|0|}''}{x_q''} \right) e^{-\frac{t}{T_q''}} \sin(t + \theta_0) - \frac{u_{|0|}}{2} \left(\frac{1}{x_d''} + \frac{1}{x_q''} \right) e^{-\frac{t}{T_a}} \right.$$

$$\left. \cos(\delta_0 - \theta_0) - \frac{u_{|0|}}{2} \left(\frac{1}{x_d''} - \frac{1}{x_q''} \right) e^{-\frac{t}{T_a}} \cos(2t + \delta_0 + \theta_0) \right\} \quad (15)$$

其中, 交流分量为

$$I_b(t) = \frac{\sqrt{2}S}{\sqrt{3}U_r} \left\{ \left[\left(\frac{E_{q|0|}''}{x_d''} - \frac{E_{q|0|}'}{x_d'} \right) e^{-\frac{t}{T_d''}} + \left(\frac{E_{q|0|}'}{x_d'} - \frac{E_{q|0|}}{x_d} \right) e^{-\frac{t}{T_d'}} + \frac{E_{q|0|}}{x_d} \right] \right.$$

$$\left. \cos(t + \theta_0) + \left(\frac{E_{d|0|}''}{x_q''} \right) e^{-\frac{t}{T_q''}} \sin(t + \theta_0) \right\} \quad (16)$$

直流分量为

$$I_{dc}(t) = \frac{\sqrt{2}S}{\sqrt{3}U_r} \left[-\frac{u_{|0|}}{2} \left(\frac{1}{x_d''} + \frac{1}{x_q''} \right) e^{-\frac{t}{T_a}} \cos(\delta_0 - \theta_0) \right] \quad (17)$$

式中, S 为发电机额定输出容量; U_r 为发电机额定电压; $E_{q|0|}''$ 为发电机交轴次暂态电动势; $E_{d|0|}''$ 为发电机直轴次暂态电动势; $E_{q|0|}'$ 为发电机交轴暂态电动势; $E_{q|0|}$ 为发电机交轴空载电动势; x_d'' 为发电机直轴次暂态电抗; x_d' 为发电机直轴暂态电抗; x_d 为发电机直轴电抗; x_q'' 为发电机交轴次暂态电抗; x_q' 为发电机交轴暂态电抗; x_q 为发电机交轴电抗; T_d'' 为直轴短路次暂态时间常数; T_d' 为交轴短路次暂态时间常数; T_a 为电枢绕组时间常数; T_d' 为直轴短路暂态时间常数; θ_0 为短路时电压值的初始相量角。

3 3种算法计算结果比较

以具体工程为例, 某核电工程主要参数: 发电机额定功率 $P = 1\,300\text{ MW}$, 发电机出口电压 $U_r = 24\text{ kV}$; 直轴次暂态电抗 $X_d'' = 0.19$; 直轴暂态电抗 $X_d' = 0.365$; 直轴同步电抗 $X_d = 2.22$; 交轴次暂态 $X_q'' = 0.218$; 交轴短路超瞬变时间常数 $T_q'' = 0.04\text{ s}$; 直轴短路超瞬变时间常数 $T_d'' = 0.398$ 。

系统三相短路电流为 55 kA , 主变压器: 额定容量为 $3 \times 493\text{ MV}\cdot\text{A}$; 额定电压为 $535/\sqrt{3} \pm 2 \times 2.5\%/24\text{ V}$; 额定阻抗为 $U_d = 20\%$; 阻抗误差为 $\pm 5\%$ 。

高压厂用变压器 (2台): 容量为 $88/44 - 44\text{ MV}\cdot\text{A}$; 额定电压为 $24/10.5 - 10.5\text{ kV}$; 调压范围为 $-15\% \sim +5\%$, 额定阻抗为 $U_d = 18\%$ 。

发电机出口断路器主弧触头分离时间考虑为 40 ms (发电机断路器首开极的最短分闸时间为

35 ± 3 ms, 额定频率的1/2周波为10 ms)。

3.1 IEC算法计算发电机出口短路电流

采用1.1节中IEC算法中的相关公式, 经计算得:

①发电机电源短路电流。短路周期分量为169.3 kA, 短路非周期分量为250.6 kA。②系统源短路电流。短路周期分量为198.0 kA, 短路非周期分量为246.5 kA。

3.2 IEEE算法计算发电机出口短路电流

基于MATHCAD平台采用IEEE算法对发电出口短路电流进行计算。

(1) 发电机电源短路电流

采用前文基于IEEE算法计算方法式(11), 将发电机主要参数输入后对发电机出口发电机电源短路电流采用进行计算, 结果如图1所示。

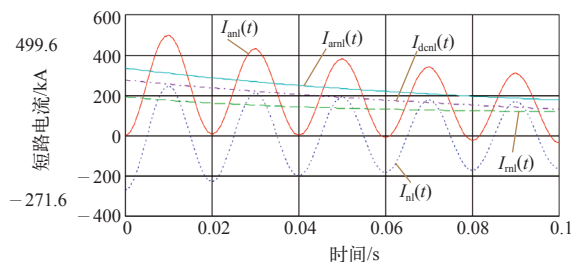


图1 发电机电源短路电流波形

I_{anl} —发电机电源非对称短路电流 I_{ami} —发电机电源非对称短路电流有效值
 I_{ni} —发电机电源对称短路电流 (交流分量)
 I_{dcni} —发电机电源短路电流直流分量
 I_{mi} —发电机电源对称短路电流 (交流分量) 有效值

(2) 系统源短路电流

采用前文基于IEEE系统源短路电流计算方法, 将系统侧主要参数 (系统短路电流、主变压器和高厂变压器等参数) 输入后对发电机出口发电机电源短路电流进行计算, 得出系统源通过主变压器短路电流、电动机通过高厂变压器的反馈电流及系统源总短路电流波形, 结果如图2~4所示。

由图1~4可以看出:

1) 无论发电机电源或系统源发生短路时, 短路电流对称分量 (交流分量) 和直流分量均随时间衰减。

2) 发电机电源短路时, 直流分量衰减很快 (大约在5个周期后, 衰减为短路发生时刻的1/2)。发电机电源短路电流直流分量百分数为100.8% (42 ms时)。

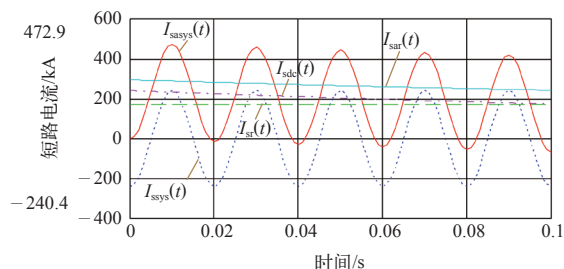


图2 系统源通过主变压器短路电流波形

I_{ssys} —系统源通过主变压器非对称短路电流
 I_{st} —系统源通过主变压器非对称短路电流有效值
 I_{ssys} —系统源通过主变压器对称短路电流 (交流分量)
 I_{sdc} —系统源通过主变压器短路电流直流分量
 I_{ssr} —系统源通过主变压器对称短路电流 (交流分量) 有效值

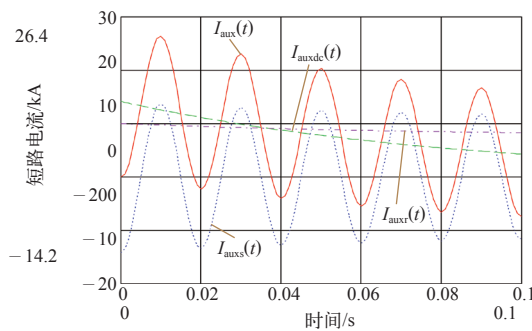


图3 电动机反馈短路电流波形

I_{aux} —电动机反馈非对称短路电流 I_{auxs} —系统源对称短路电流 (交流分量)
 I_{auxdc} —系统源短路电流直流分量
 I_{auxsr} —系统源对称短路电流 (交流分量) 有效值

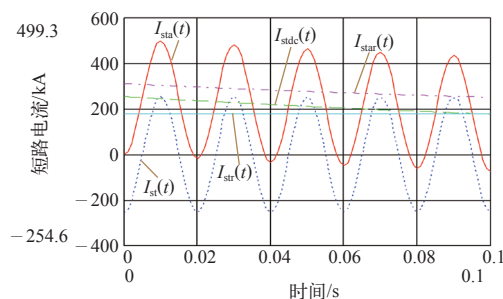


图4 系统源短路电流波形

I_{sta} —系统源非对称短路电流 I_{ssr} —系统源非对称短路电流有效值
 I_{st} —系统源对称短路电流 (交流分量) I_{sdc} —系统源短路电流直流分量
 I_{ssr} —系统源对称短路电流 (交流分量) 有效值

3) 系统源发生短路时, 短路电流主要为系统源通过主变压器的短路电流。电动机反馈短路电流仅占系统源短路电流约为5%。

4) 系统源短路电流的直流分量衰减速度较慢, 系统源短路电流直流分量百分数为86.0%

(42 ms时)。

3.3 改进IEEE算法计算发电机出口短路电流

改进IEEE算法发电机源短路电流是在IEEE算法基础上增加了3种负载工况，基于MATHCAD平台采用本文提出的基于IEEE算法考虑不同工况下发电机源短路电流计算方法按式(15)~式(17)进行计算。

(1) 发电机源短路(功率因数0.9滞后)

考虑发电机在正常工况下运行(电流相位滞后于电压相位，功率因数0.9，发电机发出感性无功功率)，计算出发电机源短路电流，结果如图5所示。

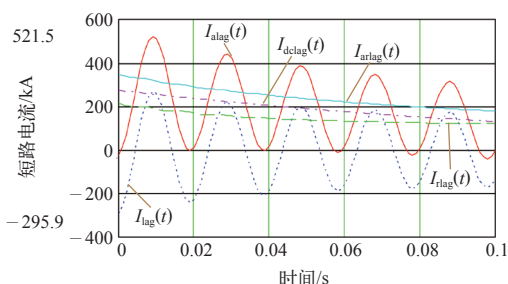


图5 负载工况下(功率因数0.9滞后)

I_{alag} —发电机源非对称短路电流 I_{arlag} —发电机源非对称短路电流有效值
 I_{lag} —发电机源对称短路电流(交流分量)
 I_{dclag} —发电机源短路电流直流分量
 I_{rlag} —发电机源对称短路电流(交流分量)有效值

(2) 发电机源短路(功率因数0.95超前)

考虑发电机在进相运行工况下(电流相位超前于电压相位，功率因数0.95，发电机发出容性无功功率)，计算出发电机源短路电流，如图6所示。

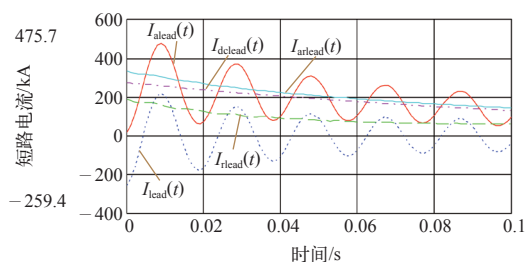


图6 负载工况下(功率因数0.95超前)

I_{alcad} —发电机源非对称短路电流 I_{arlead} —发电机源非对称短路电流有效值
 I_{lead} —发电机源对称短路电流(交流分量)
 I_{dclcad} —发电机源短路电流直流分量
 I_{rlead} —发电机源对称短路电流(交流分量)有效值

(3) 发电机源短路(功率因数为1)

考虑发电机仅发出有功功率(电流相位与电压相位相同)，计算出发电机源短路电流，结果如图7所示。

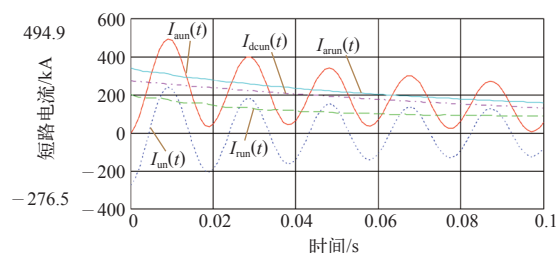


图7 负载工况下(功率因数为1)

I_{aun} —发电机源非对称短路电流 I_{arun} —发电机源非对称短路电流有效值
 I_{un} —发电机源对称短路电流(交流分量)
 I_{dcun} —发电机源短路电流直流分量
 I_{run} —发电机源对称短路电流(交流分量)有效值

由图5~7可以看出。

1) 3种运行工况下发生发电机源短路时，短路电流直流分量相同，衰减速度也相同。

2) 正常运行工况(功率因数0.9滞后)发生发电机源短路时，发电机源对称短路电流最大。

3) 其余两种工况(功率因数超前和功率因数为1)短路电流值均小于空载工况下发电机源短路电流。具体结果见3.4节。

3.4 3种算法短路电流结果比较

3种算法短路电流结果比较如下表所示。

由上述结果可以发现：

1) 采用IEC算法计算发电机出口短路电流无论发电机源短路电流及系统源短路电流计算值均大于采用IEEE算法计算结果。

2) 采用改进IEEE算法增加了3种工况后，在正常负载工况下(功率因数0.9滞后)较采用IEEE算法计算值稍大，其余两种工况均小，可以忽略。

3.5 发电机出口断路器选型

根据ABB公司提供的产品数据，HEC-7C型断路器系统源短路电流周期分量开断电流为210 kA，直流分量为 $210 \text{ kA} \times 75\% \times \sqrt{2} = 222.7 \text{ kA}$ 。

发电机源短路电流周期分量开断电流为152 kA，直流分量为 $152 \text{ kA} \times 120\% \times \sqrt{2} = 258 \text{ kA}$ 。HEC-

表 3 3种算法短路电流计算结果比较

算法		IEC 60906	IEEE	基于IEEE改进算法			
		算法	算法	负载（功率因数0.9 滞后）	负载（功率因数0.95 超前）	负载（功率因数为1）	空载
发电机电源 短路电流	短路时工况						
	短路周期分量/kA	169.3	141.0	142.2	85.2	110.7	141.0
	短路非周期分量/kA	250.6	201.1	201.1	201.1	201.1	201.1
系统源 短路电流	直流分量百分数（%）	104.6	100.1	100.0	166.9	128.4	100.1
	短路周期分量/kA	198.0	179.0		179.0		
	短路非周期分量/kA	246.5	217.8		217.8		
		直流分量百分数（%）	88.1	86.0	86.0		

9C型断路器，系统源短路电流周期分量开断电流为250 kA，直流分量为 $250\text{ kA} \times 75\% \times \sqrt{2} = 265\text{ kA}$ ，发电机电源短路电流周期分量开断电流为200 kA，直流分量为 $200\text{ kA} \times 110\% \times \sqrt{2} = 311\text{ kA}$ 。

因此若采用IEC算法计算，无论系统源还是发电机电源短路电流交—直流分量均较大，HEC—7C型断路器无法满足要求，需选择更高一级断路器HEC—9C，两者相差约500万元；采用IEEE算法或改进IEEE算法，HEC—7C型断路器系统源和发电机电源均满足要求。

4 结束语

从上述两种发电机出口端短路电流计算公式的对比及计算实例的计算结果看，采用IEC 60909算法算出的结果较采用基于IEEE算法计算得出的结果大。

IEC 60909—1999 是由国际电工委员会正式出版的用于电力系统短路电流计算的指导性文件，适用范围比较广泛，简单或复杂电力网络结构均能采用这一方法，简化了发电机近端短路的短路电流计算，只考虑了短路电流超瞬态衰减过程，IEC算法偏于安全^[7]。

而IEEE算法计算采用了较为准确的发电机、电动机短路模型。另外发电机出口断路器规范仅有IEEE规程即IEEE std C37.013，IEC没有具体针对发电机出口断路器规程，因此建议发电机出口断路器选型时采用IEEE算法。

由于对于发电机数学模型，空载工况下模型最简单，其他工况下仅负载工况（功率因数滞后）时短路电流稍大于空载工况下短路电流，因

此IEEE C37.013算法仅考虑了空载而IEEE算法中仅考虑发电机空载一种工况，所提出的基于IEEE算法的考虑不同工况的算法。建议选择断路器开断能力冗余系数较小，需准确计算时采用改进IEEE算法进行计算。

参考文献

[1] 谢文，朱永强，崔文进． IEC 60909短路电流计算标准分析 [J]． 电力建设，2005，26（2）：23-25．

[2] IEC 60909—0—2001 Short-circuit currents in three-phase A.C. systems—part 0: calculation of currents [S]． Geneva: The International Electrotechnical Commission，2002．

[3] 周益三． IEC三相交流系统短路电流计算的使用 [J]． 氮肥设计，1994，32（3）：8-13．

[4] IEEE C37.013—1997 IEEE standard for AC high-voltage generator circuit breakers rated on a symmetrical current basis [S]． New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers，1997．

[5] IEEE C37.010—1999 IEEE application guide for AC high-voltage circuit breakers rated on a symmetrical current basis [S]． New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers，1999．

[6] 李光琦． 电力系统暂态分析 [M]． 北京：中国电力出版社，1995．

[7] 杜银昌，姜海滨，杨健． 发电机出口端短路电流计算方法分析 [J]． 中国造船，2007，48（增刊）：378-381．

（收稿日期：2015—07—13） EA