

三相短路故障时小容量发电机出口断路器瞬态恢复电压

刘渝根,米宏伟

(重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室,重庆 400044)

摘要: 利用 PSCAD/EMTDC 软件计算分析了在开断条件最恶劣的故障情况下,12~30 MW 小容量发电机出口断路器的瞬态恢复电压(TRV),并利用 TRV 上升率确定普通配电型断路器可以替代发电机断路器(GCB)安装在发电机出口处的条件。计算结果表明:当发电机出线端发生三相短路故障时,普通配电型断路器可以替代 GCB 安装在 12~24 MW 的发电机出口处,而 24~30 MW 的发电机出口处必须安装 GCB;当变压器低压侧出线端发生三相短路故障时,普通配电型断路器可以替代 GCB 安装在 12~30 MW 的发电机出口处。给出了 TRV 的手算公式。

关键词: 小容量发电机; 配电断路器; 发电机断路器; 三相短路故障; 瞬态恢复电压; 断路器; 模型

中图分类号: TM 56

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.06.021

0 引言

近年来,随着新能源技术的蓬勃发展,小容量(≤ 30 MW)发电机组也得到了广泛的应用。学者已论证了大容量发电机组出口装设发电机断路器(GCB)的必要性^[1-5],但是对于小容量的发电机组出口是否应装设发电机断路器并没有进行深入研究。

同时由于技术和材料的改进,普通配电型断路器逐渐可适应开断条件更为苛刻的场合^[6-7]。因此对于设计人员而言,一般采用改进的配电型断路器安装在发电机出口处。但是改进的配电型断路器在设计时仅考虑了断路器开断直流分量的能力,而没有考虑断路器开断后的瞬态恢复电压。而断路器的瞬态恢复电压(TRV)上升率过大会影响断路器的开断能力,从而导致断路器发生故障^[8-10]。

在发电机回路中,发电机出口断路器开断时 TRV 上升率较高^[11-14]。GB/T 14824—2008《高压交流发电机断路器》规定:对于额定电压为 12 kV 的断路器,由系统源提供短路电流时,TRV 上升率的标准值为 3.5 kV/ μ s;由发电机源提供短路电流时,TRV 上升率的标准值为 1.6 kV/ μ s。普通配电型断路器仅能满足 TRV 上升率为 0.34 kV/ μ s 的情况,而不适合安装在 TRV 上升率较高的发电机回路中。由于制造工艺和所采用的材料的不同,发电机断路器和普通配电型断路器的价格相差很大:每台发电机断路器价格为 70 万元,而每台配电型断路器价格仅为 12 万元。

从技术的角度看,发电机出口安装发电机断路器更能确保系统的安全可靠;从经济的角度看,发电机

出口安装配电型断路器更为合理。因此本文从 TRV 上升率的角度出发,对小容量(≤ 30 MW)发电机出口断路器的 TRV 进行仿真研究,确定在何种条件下配电型断路器可以替代发电机断路器安装在发电机出口处。同时为满足实际工程的需要,笔者还在仿真的基础上推导了用于计算发电机出口断路器 TRV 大小的公式,并验证了该公式的正确性。

1 仿真模型的建立

1.1 断路器模型

本文用非线性电阻来模拟发电机断路器的动态状况:通过搭建控制系统控制非线性电阻值,来模拟断路器处于合闸、稳态燃弧、熄弧断开时的状态。

断路器处于合闸状态时,其主回路电阻很小^[15]。上海通用电气开关有限公司提供的断路器产品说明书中表明,不同型号的断路器主回路电阻值在 40~60 $\mu\Omega$ 之间。为不失一般性,本文取断路器主回路电阻值为 50 $\mu\Omega$ 。

断路器在操动机构的作用下,动静触头开始分离,此时两触头间产生稳态燃烧的电弧。文献[16]表明稳态燃弧阶段弧阻基本为恒定值,其大小与回路的振荡频率有关,阻值基本在 0.5~5.0 Ω 之间。为不失一般性,本文取稳态燃弧阶段弧阻为 2 Ω 。

在电弧电流过零瞬间,外界电路向电弧提供的能量小于电弧散失的能量,从而进入熄弧阶段^[17-20]。这个过程可以用 Mayr-Schwarz 模型描述:

$$\frac{1}{g^{1-\alpha}} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} \left[\frac{u(t)i(t)}{p_0 g^\beta} - 1 \right] \quad (1)$$

其中, $u(t)$ 为电弧电压(V); $i(t)$ 为电弧电流(A); g 为电弧电导(S); p_0 为电弧散热功率(W); τ 为时间常数(s)。根据典型的 12 kV 断路器开断实验所获得的

收稿日期:2014-05-04;修回日期:2015-01-07

基金项目:国家创新研究群体基金资助项目(51021005)

Project supported by the Funds for Innovative Research Groups of China(51021005)

零区波形,利用最小函数法可计算出电弧模型中各参数的取值: $\alpha=0.14,\beta=0.30,\tau=10\text{ }\mu\text{s},p_0=120\text{ kW}$ 。

由式(1)可知,在熄弧阶段电弧电阻是非线性的。因此在仿真过程中,断路器可以用一非线性电阻来等效代替,对该非线性电阻的控制过程如图 1 所示。

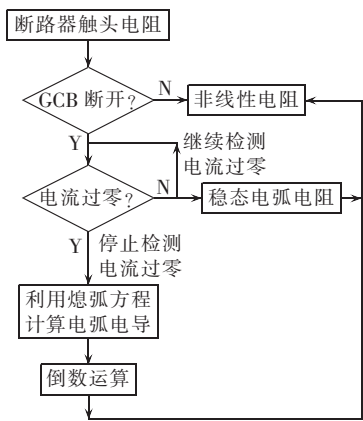


图 1 非线性电阻控制流程图

Fig.1 Flowchart of nonlinear resistor control

1.2 同步发电机模型

在本文的仿真分析中,发电机采用的是 PSCAD 模型库中的同步发电机模型,如图 2 所示。

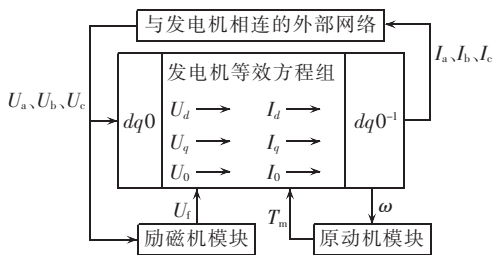


图 2 发电机模型图

Fig.2 Schematic diagram of generator model

该模型用诺顿电流源等效代替同步发电机,利用发电机的额定电压实时计算三相电流,并注入外部网络。为计算方便,该模型首先把相坐标系下的三相电压 U_a, U_b, U_c 转换成 $dq0$ 坐标系下的 dq 轴绕组端电压 U_d, U_q, U_0 ,并通过 dq 轴等效电路及状态空间方程组,计算出 $dq0$ 坐标系下的电流 I_d, I_q, I_0 ,并再次转换成相坐标系下的三相电流 I_a, I_b, I_c ,进而注入外部网络。

这个模型充分考虑了定子绕组、励磁绕组及阻尼绕组的暂态过程,适用于分析发电机机端或变压器外部故障及故障切除后的暂态过程。仿真模型中,不同容量的发电机参数如表 1 所示。表中, R_s 为发电机定子绕组的直流电阻; X_d 为直轴电抗标幺值; X'_d 为直轴暂态电抗标幺值; X''_d 为直轴次暂态电抗标幺值。

1.3 系统模型

仿真模型是按照“同步发电机-断路器-变压器-

表 1 不同容量发电机参数

Table 1 Generator parameters for different capacities

型号	R_s/Ω	X_d	X'_d	X''_d
QF-12-2	0.0202	1.926	0.198	0.1184
QF(N)-15-2	0.0197	2.325	0.232	0.1363
QF2-18-2	0.0114	1.650	0.170	0.1100
QF2-20-2	0.0114	1.840	0.190	0.1205
QF2-22-2	0.0114	1.990	0.210	0.1310
QF(W)-30-2	0.0059	2.280	0.218	0.2174

系统源”的接线形式建立的。

图 3 中,电缆型号为 ZR-YJV22-12/20 kV-3×240 mm²;变压器为 Δ -Y 接线方式,变比为 $(121\pm 8\times 1.25\%)$ kV/10.5 kV;110 kV 系统源用一个理想电压源串电感进行等效,该电感的计算如式(2)所示。

$$L = \frac{U_{base}^2}{P_{sc}} \times \frac{1}{2\pi f} \tag{2}$$

其中, U_{base} 为系统源的基准电压(kV); P_{sc} 为系统源的短路容量(MW); f 为电源频率(Hz)。

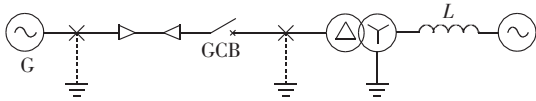


图 3 仿真模型图

Fig.3 Schematic diagram of simulation model

通过比较发电机回路中发生单相接地故障、两相短路故障、三相短路故障等不同故障情况下的计算结果,发现系统中发生三相短路故障时,发电机出口断路器开断条件最为恶劣。因此本文主要阐述系统中发生发电机出线端三相短路故障、变压器低压侧出线端三相短路故障这 2 种故障情况下,发电机断路器的 TRV,其中故障位置如图 3 中虚线接地部分所示。

仿真模型中设定系统在 0.237 s 发生三相短路故障,在继电保护及断路器操动机构动作后,在 0.302 s 断路器两触头间出现电弧。

2 发电机出线端三相短路故障时断路器 TRV 仿真分析

2.1 12 MW 发电机断路器 TRV 仿真分析

以 12 MW 发电机为例,当发生发电机出线端三相短路故障时,三相短路电流及出现在断路器断口间的 TRV 波形分别如图 4 和图 5 所示。

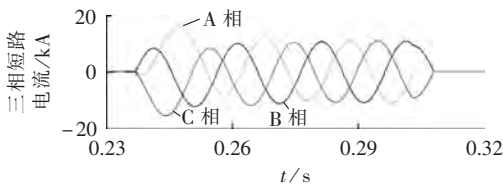


图 4 三相短路电流波形

Fig.4 Waveform of three-phase short circuit current

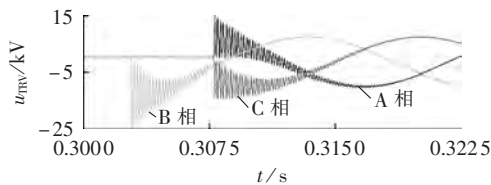


图 5 断路器断口间的 TRV 波形

Fig.5 Waveforms of TRV between open contacts of circuit breaker

图 4 表明:三相短路电流的最大值为 16.37 kA,无电流延迟过零点状况。通过对短路电流进行傅里叶变换可知,短路电流的交流分量有效值为 7.64 kA,直流分量百分数为 23%。在本文的研究中,对于不同容量(≤ 30 MW)的发电机回路,在发生不同短路故障后,短路电流的交流分量有效值最大为 26.81 kA、直流分量百分数最大为 29%。而普通配电型断路器能够开断 40 kA、直流分量百分数为 35%的短路电流,但其 TRV 上升率参数仅为 0.34 kV/ μ s。因此本文在对发电机出口断路器的选型中,对断路器开断短路电流的能力不再赘叙,而着重从 TRV 上升率的角度出发确定在何种条件下普通配电型断路器可以替代发电机断路器。

由于 B 相断路器电流最先过零使其电弧熄灭,故 B 相是首开相,其断口间最先出现 TRV;A、C 两相断路器电弧电流同时过零、同时开断,其断口间同时出现 TRV,且出现的时间滞后 B 相 5 ms。三相断路器断口间的 TRV 经过 5~7 ms 的衰减振荡后,过渡到幅值为 7.87 kV 的工频恢复电压。改变故障发生的时间,使 A 相、C 相分别作为首开相,得到的仿真结果与上述情况类似。

对三相断路器断口间的 TRV 波形进行分析计算后,可得到如表 2 所示的计算结果,表中 U_c 为 TRV 的峰值电压; t_3 为 TRV 的参考时间; U_c/t_3 为 TRV 的上升率; f_{eq} 为 TRV 的等值频率。由表 2 可见,B 相断路器 TRV 波形的峰值电压及上升率最大,A、C 两相断路器 TRV 波形中的峰值电压及上升率相接近且略低于首开相断路器 TRV 波形中的峰值电压及上升率;首开相断路器 TRV 波形的等值频率要低于随后断开的 A、C 两相断路器 TRV 波形的等值频率。这是因为当 B 相断路器开断后,电路中的拓扑结构已发生了改变,从而导致首开相和随后开断的两相断路器 TRV 波形在峰值电压、参考时间、上升率、等值频率等参数上的不同。

表 2 三相断路器瞬态恢复电压计算结果

Table 2 Calculative TRV of three-phase circuit breaker

相别	U_c/kV	$t_3/\mu\text{s}$	$(U_c/t_3)/(\text{kV}\cdot\mu\text{s}^{-1})$	f_{eq}/kHz
A 相	14.622	87	0.1681	5.263
B 相	24.623	87	0.2830	4.878
C 相	14.182	87	0.1630	5.263

表 2 中的计算结果表明:三相断路器 TRV 上升率的最大值为 0.283 0 kV/ μ s(首开相),要低于 GB 1984—2003《高压交流断路器》对额定电压为 12 kV 的配电型交流断路器 TRV 上升率的规定值 0.34 kV/ μ s,更低于 GB/T14824—2008《高压交流发电机断路器》对由系统源提供的、额定电压为 12 kV 的发电机断路器 TRV 上升率的规定值 3.5 kV/ μ s。这就表明在“同步发电机-断路器-变压器-系统源”的主接线形式下,当发生发电机出线端三相短路故障后,使用配电型断路器能够满足 GB1984—2003《高压交流断路器》对断路器 TRV 的要求。即在这种情况下,普通配电型断路器可以替代发电机断路器安装在发电机出口处。

2.2 12~30 MW 小容量发电机断路器 TRV 仿真分析

从以上分析可知,首开相断路器 TRV 上升率最大,最难开断。因此本节在对 12~30 MW 的小容量发电机断路器 TRV 的仿真研究中,均以首开相为例进行说明。

当发电机出线端发生三相短路故障时,在发电机容量为 15 MW、18 MW、20 MW、22 MW、30 MW 的情况下,分别对发电机断路器 TRV 进行仿真分析,并对 TRV 波形参数进行计算,计算结果如表 3 所示,表中 S 为发电机容量。

表 3 不同容量的发电机断路器 TRV 计算结果

Table 3 Calculative TRV of generator circuit breaker for different capacities

S/MW	U_c/kV	$t_3/\mu\text{s}$	$(U_c/t_3)/(\text{kV}\cdot\mu\text{s}^{-1})$
15	24.572	84	0.2925
18	24.123	80	0.3015
20	24.083	76	0.3168
22	24.034	73	0.3292
30	23.877	63	0.3790

表 3 表明:当发电机出线端发生三相短路故障时,随着发电机容量的增大,首开相断路器断口间 TRV 参考时间急剧减小,TRV 上升率随之增大。利用编制的 MATLAB 程序,绘制出首开相断路器 TRV 上升率随发电机容量变化的曲线,如图 6 所示。

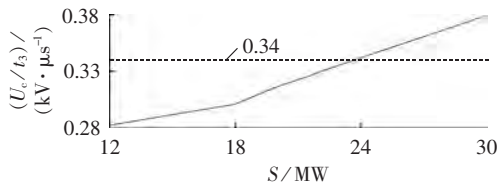


图 6 TRV 上升率与发电机容量之间的关系曲线

Fig.6 Relationship curve between TRV rising rate and generator capacity

图 6 表明:随着发电机容量的增大,TRV 上升率也随之增大,且发电机容量为 12~18 MW 时 TRV 上升率增大的速率要低于发电机容量为 18~30 MW 时

的 TRV 上升率增大的速率;当发电机容量在 24 MW 以下时,TRV 上升率均未超过 $0.34 \text{ kV}/\mu\text{s}$ 。即在 24 MW 以下的小容量发电机中,当发生发电机出线端三相短路故障后,普通配电型断路器可以替代发电机断路器安装在发电机出口处。当发电机容量在 24 MW 以上时,TRV 上升率已超过 $0.34 \text{ kV}/\mu\text{s}$ 。即在 24 MW 以上的小容量发电机中,当发生发电机出线端三相短路故障后,普通配电型断路器不可以替代发电机断路器安装在发电机出口处。

2.3 TRV 手算公式

在实际工程中,设计人员更倾向于利用简便的公式快速计算出 TRV 的大小。因此为推导出首开相断路器 TRV 的计算公式,本文把图 3 所示的三相电路等效为单相电路(首开相断路器断开、其余两相断路器闭合),如图 7 所示。图中 U_{eq} 、 R_{eq} 、 L_{eq} 、 C_{eq} 分别为系统等效电源、电阻、电感和电容。

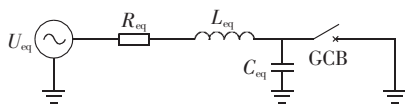


图 7 断路器 TRV 的单相计算等值电路
Fig.7 Single-phase equivalent circuit of circuit breaker for TRV calculation

当等效电路中元件参数满足式(3)所示的数学条件时,可推导出 TRV 的数学表达式,如式(4)所示。

$$\frac{1}{L_{\text{eq}} C_{\text{eq}}} \gg \frac{R_{\text{eq}}^2}{4L_{\text{eq}}^2} \quad (3)$$

$$u_{\text{TRV}}(t) = \sqrt{2} U_{\text{eq}} [\cos(\omega t) - e^{-R_{\text{eq}} t / (2L_{\text{eq}})} \cos(f_{\text{oc}} t)] \quad (4)$$

$$f_{\text{oc}} = \sqrt{\frac{1}{L_{\text{eq}} C_{\text{eq}}} - \frac{R_{\text{eq}}^2}{4L_{\text{eq}}^2}} \quad (5)$$

其中, $u_{\text{TRV}}(t)$ 为 TRV 瞬时值; ω 为电源频率; f_{oc} 为由电路参数确定的振荡曲线的频率。

根据式(3)所示的等效电路中各元件参数满足的数学条件,可求取 TRV 的峰值电压 U_c 及参考时间 t_3 分别如式(6)、式(7)所示。

$$U_c = \sqrt{2} U_{\text{eq}} \left[1 + \exp\left(-\frac{R_{\text{eq}} \pi}{2} \sqrt{\frac{C_{\text{eq}}}{L_{\text{eq}}}}\right) \right] \quad (6)$$

$$t_3 = \pi \sqrt{L_{\text{eq}} C_{\text{eq}}} \quad (7)$$

根据仿真结果,逐步修正图 6 中各等效参数的取值公式,如式(8)所示。

$$\begin{cases} U_{\text{eq}} = 1.5 U / \sqrt{3} \\ R_{\text{eq}} = 1.5 \left(\frac{PU^2}{1000 S_N^2} + r l \right) \\ L_{\text{eq}} = 1.5 \left[\left(\frac{U_k \% U^2}{100 S_N} + X \right) / 314 + L \left(\frac{U}{U_0} \right)^2 \right] \\ C_{\text{eq}} = C + Y \times 10^6 / 314 \end{cases} \quad (8)$$

其中, U 为变压器低压侧的额定电压(kV); S_N 为变压器的额定容量(MV·A); P 为变压器的铜耗(kW);

$U_k \%$ 为变压器的短路电压百分数; C 为变压器低压绕组对地电容(μF); L 为系统源等效短路电感(H); U_0 为系统源电压(kV); r 为单位长度电缆的直流电阻(Ω/km); l 为电缆长度(km); X 为电缆电抗(Ω); Y 为电缆容纳(S); U_{eq} 、 R_{eq} 、 L_{eq} 、 C_{eq} 的单位分别为 kV、 Ω 、H、 μF 。

利用式(4)~(8),编制 MATLAB 程序,绘制出当 12 MW 发电机出线端发生三相短路故障时,首开相断路器的 TRV 波形,如图 8 所示。

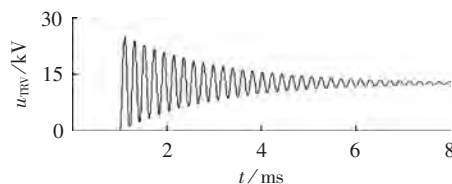


图 8 MATLAB 程序绘制的断路器 TRV 波形曲线
Fig.8 Circuit breaker TRV waveform drawn by MATLAB program

程序运行结果为:TRV 峰值电压为 25.0545 kV,参考时间为 $91 \mu\text{s}$,TRV 上升率为 $0.2753 \text{ kV}/\mu\text{s}$,等效频率为 4.8169 kHz。将该结果及图 8 波形同图 5 中 B 相 TRV 波形及表 2 中 B 相断路器 TRV 计算数据相比较后可以看出,二者之间误差不大。即在实际工程中,可用式(4)~(8)来计算发电机出口断路器的 TRV。当发电机容量为 15 MW、18 MW、20 MW、22 MW、30 MW 时,用式(4)~(8)计算出的结果均与仿真结果吻合,进一步验证了式(4)~(8)TRV 计算公式的正确性。

3 变压器低压侧出线端三相短路故障时断路器 TRV 仿真分析

3.1 12 MW 发电机断路器 TRV 仿真分析

以 12 MW 发电机为例,当变压器低压侧出线端发生三相短路故障时,出现在断路器断口间的 TRV 波形如图 9 所示。

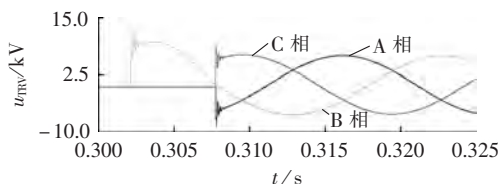


图 9 断路器断口间的 TRV 波形
Fig.9 Waveforms of TRV between open contacts of circuit breaker

对三相断路器断口间的 TRV 波形进行分析计算后,可得到如表 4 所示的计算结果。由表 4 可见:B 相断路器 TRV 波形的峰值电压及上升率均最大,同时开断的 A、C 两相断路器 TRV 波形的峰值电压及上升率相接近且略低于首开相断路器 TRV 波形的

表 4 三相断路器瞬态恢复电压计算结果

Table 4 Calculative TRV of three-phase circuit breaker

相别	U_c/kV	$t_3/\mu\text{s}$	$(U_c/t_3)/(\text{kV}\cdot\mu\text{s}^{-1})$	f_{eq}/kHz
A 相	8.721	77	0.113	6.536
B 相	13.546	77	0.176	5.586
C 相	9.031	77	0.117	6.452

峰值电压及上升率;首开相断路器 TRV 波形的等值频率要低于随后断开的 A、C 两相断路器 TRV 波形的等值频率。这是因为当 B 相断路器开断后,电路中的拓扑结构已改变,从而导致首开相和随后开断的两相断路器 TRV 波形的峰值电压、参考时间、上升率、等值频率等参数不相同。

同样 B 相断路器电流最先过零使其电弧熄灭, B 相是首开相,其断口间最先出现 TRV;A、C 两相断路器电弧电流同时过零同时开断,其断口间同时出现 TRV,且出现的时间滞后 B 相 5 ms。三相断路器断口间的 TRV 经过 0.68 ms 的衰减振荡后,过渡到幅值为 7.21 kV 的工频恢复电压。改变故障发生的时间,使 A 相、C 相分别作为首开相,得到的仿真结果与上述情况类似。

表 4 的计算结果表明:三相断路器 TRV 上升率最大值为 0.176 kV/μs(首开相),低于 GB1984—2003《高压交流断路器》对额定电压为 12 kV 的普通配电型交流断路器 TRV 上升率的规定值 0.34 kV/μs,更低于 GB/T14824—2008《高压交流发电机断路器》对由发电机源提供的、额定电压为 12 kV 的发电机断路器 TRV 上升率的规定值 1.6 kV/μs。这就表明在“同步发电机-断路器-变压器-系统源”的主接线形式下,当发生主变压器低压侧出线端三相短路故障后,使用普通配电型断路器能够满足 GB1984—2003《高压交流断路器》对断路器瞬态恢复电压的要求。即在这种情况下,普通配电型断路器可以替代发电机断路器安装在发电机出口处。

3.2 12~30 MW 小容量发电机断路器 TRV 的仿真分析

同样对于 12~30 MW 小容量发电机断路器而言,首开相断路器 TRV 上升率最大,最难断开。因此本节在对 12~30 MW 小容量发电机断路器 TRV 的仿真研究中,均以首开相为例进行说明。

当变压器低压侧出线端发生三相短路故障时,在发电机容量为 15 MW、18 MW、20 MW、22 MW、30 MW 的情况下,分别对发电机断路器 TRV 进行仿真分析,并对 TRV 波形参数进行计算,计算结果如表 5 所示。

表 5 表明:随着发电机容量的增大,首开相断路器断口间 TRV 参考时间逐渐减小,TRV 上升率逐渐增大。这是因为不同容量的发电机,同步电抗、暂态

表 5 不同容量的发电机的断路器瞬态恢复电压计算结果

Table 5 Calculative TRV of generator circuit breaker for different capacities

S/MW	U_c/kV	$t_3/\mu\text{s}$	$(U_c/t_3)/(\text{kV}\cdot\mu\text{s}^{-1})$
15	15.173	75	0.2023
18	16.493	70	0.2356
20	16.423	69	0.2380
22	16.626	69	0.2410
30	16.013	63	0.2542

电抗、次暂态电抗不同,从而导致 TRV 上升率的不同。利用编制的 MATLAB 程序,绘制出首开相断路器 TRV 上升率随发电机容量变化的曲线,见图 10。

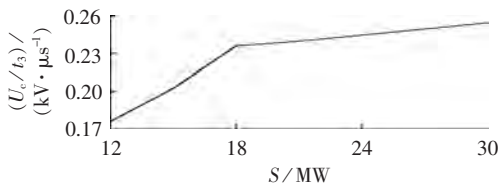


图 10 TRV 上升率与发电机容量之间的关系曲线

Fig.10 Relationship curve between TRV rising rate and generator capacity

图 10 表明:随着发电机容量的增大,TRV 上升率也随之增大,且发电机容量为 12~18 MW 时 TRV 上升率增大的速率要高于发电机容量为 18~30 MW 时的 TRV 上升率增大的速率。当发电机容量为 12~30 MW 时,TRV 上升率最大值为 0.254 2 kV/μs,没有超过 0.34 kV/μs,即在 12~30 MW 的小容量发电机中,当发生变压器低压侧出线端三相短路故障后,普通配电型断路器可以替代发电机断路器安装在发电机出口处。

3.3 TRV 手算公式

同样为满足实际工程的需要,本文也推导了在变压器低压侧出线端发生三相短路故障的情况下,用于计算首开相断路器 TRV 的公式。等效电路及相关数学公式分别如 2.3 节中的图 7 及式(3)—(7)所示。

根据仿真结果,逐步修正图 7 中各等效参数的取值公式,如式(9)所示。

$$\begin{cases} U_{\text{eq}}=U/\sqrt{3} \\ R_{\text{eq}}=1.5(R+rl)\times10 \\ L_{\text{eq}}=1.5\left[\left(\frac{X_d'U^2}{S}+X\right)/314+2.135\times10^{-3}\right] \\ C_{\text{eq}}=C+Y\times10^6/314 \end{cases} \quad (9)$$

其中, U 为发电机的额定电压(kV); X_d' 为发电机的暂态电抗标么值; S 为发电机的额定容量(MV·A); R 为发电机定子绕组电阻(Ω); C 为发电机绕组对地电容(μF); r 为单位长度电缆的直流电阻(Ω/km); l 为电缆长度(km); X 为电缆电抗(Ω); Y 为电缆容纳(S); U_{eq} 、 R_{eq} 、 L_{eq} 、 C_{eq} 的单位分别为 kV、 Ω 、H、 μF 。

利用式(3)—(7)及式(9),编制 MATLAB 程序,

绘制出当发电机容量为 12 MW 且变压器低压侧出线端发生三相短路故障时,首开相断路器的 TRV 波形,如图 11 所示。

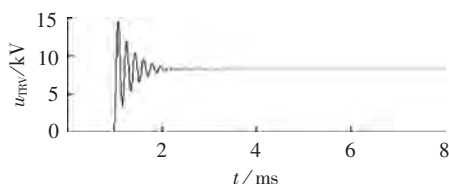


图 11 MATLAB 程序绘制的断路器 TRV 波形曲线

Fig.11 Circuit breaker TRV waveform drawn by MATLAB program

程序运行结果为:TRV 峰值电压为 14.012 kV,参考时间为 79 μ s,TRV 上升率为 0.1773 kV/ μ s,等值频率为 5.58 kHz。将该结果及图 11 中波形和图 9 中 B 相 TRV 波形及表 4 中 B 相断路器 TRV 计算数据相比较后可以看出,二者之间误差不大,即在实际工程中,可以利用式(3)—(7)、(9)计算发电机断路器的 TRV。当发电机容量为 15 MW、18 MW、20 MW、22 MW、30 MW 时,利用式(3)—(7)、(9)计算出来的结果均与仿真结果相吻合,进一步验证了式(3)—(7)、(9) TRV 计算公式的正确性。

由式(8)、(9)及大量的仿真计算可知,系统源的短路容量、变压器的阻抗等参数对发电机断路器的 TRV 值有一定的影响。但大量安装小容量发电机组的新能源发电厂一般接于 110 kV 的交流系统,此时系统源的短路容量、变压器的阻抗等参数可以看作一个定值,故其对发电机断路器的 TRV 影响不大。

一个工频周期内不同的短路时刻对发电机断路器的 TRV 也有一定的影响。通过大量的仿真计算可知,当系统中发生三相短路故障时,系统电源电压恰好处于峰值,此时发电机断路器的 TRV 最大。由于系统发生短路的时刻具有随机性,因此本文选取有代表性的时刻 0.237 s(此时系统电源电压处于峰值)作为系统发生三相短路故障的时刻。

4 结论

本文利用 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真软件,计算了在发电机回路中发生断路器开断条件最恶劣的 2 种故障情况时,发电机断路器的 TRV,并从 TRV 上升率的角度出发确定在何种条件下配电型断路器可以替代发电机断路器安装在发电机出口处。本文得到结论如下。

a. 当发电机出线端发生三相短路故障时,首开相断路器 TRV 上升率最大,且 TRV 上升率随发电机容量的增加而增大;当发电机容量为 12~24 MW 时,TRV 上升率均未超过 0.34 kV/ μ s,普通配电型断路器可以替代发电机断路器安装在发电机出口处。当

发电机容量为 24~30 MW 时,TRV 上升率已经超过 0.34 kV/ μ s,普通配电型断路器不能替代发电机断路器安装在发电机出口处。

b. 当变压器低压侧出线端发生三相短路故障时,首开相断路器 TRV 上升率最大,并且 TRV 上升率随着发电机容量的增加而增大;当发电机容量为 12~30 MW 时,TRV 上升率均未超过 0.34 kV/ μ s,普通配电型断路器可以替代发电机断路器安装在发电机出口处。

c. 为满足实际工程的需要,将实际三相电路等效为单相电路,推导出发电机断路器 TRV 的计算公式及等效电路中各参数的取值方法,并通过多次仿真计算验证了该公式的正确性。

参考文献:

- [1] 张爽. 大容量发电机出口断路器选择[J]. 高压电器,2011,47(11): 77-80.
ZHANG Shuang. Circuit breakers selection method for large capacity AC high voltage generator[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(11): 77-80.
- [2] 陈尚发. 大容量发电机出口断路器在我国制造和应用问题[J]. 电力设备,2006,7(3):50-52.
CHEN Shangfa. Manufacturing and application of generator circuit breaker in China[J]. Electrical Equipment, 2006, 7(3): 50-52.
- [3] 梅强. 大容量发电机出口断路器的选择[J]. 华东电力,2005(12): 78-81.
MEI Qiang. Selection of outlet circuit breakers for high capacity generators[J]. East China Electric Power, 2005(12): 78-81.
- [4] 阮伟. 大型单元式机组装设发电机出口断路器(GCB)优劣性之比较[J]. 电气应用,2006,25(10):175-177.
RUAN Wei. Advantages and disadvantages of large unit with generator circuit breaker[J]. Electrotechnical Application, 2006, 25(10): 175-177.
- [5] 娄素华,尹项根,陈德树. 发电机机端装设断路器探讨和仿真研究[J]. 电力自动化设备,2001,21(4):15-19.
LOU Suhua, YIN Xianggen, CHEN Deshu. Discussion on generator circuit breaker and simulation study[J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21(4): 15-19.
- [6] 赵力楠. 一种高压交流发电机用卧式真空断路器:中国,ZL2009 20245792.3[P]. 2010-09-08.
- [7] 刘春风. 小容量发电机出口保护用真空断路器的选择[J]. 电气技术,2011,12(2):80-82.
LIU Chunfeng. Selection method for large AC high voltage generator circuit breakers[J]. Electrical Engineering, 2011, 12(2): 80-82.
- [8] 徐国政,张节容,钱家骊. 高压断路器原理和应用[M]. 北京:清华大学出版社,2000:128-147.
- [9] 张纬钺,何金良,高玉明. 过电压防护及绝缘配合[M]. 北京:清华大学出版社,2002:178-185.
- [10] 刘洪顺,李庆民,姜杰,等. 电感型 FCL 对断路器恢复电压上升率的影响[J]. 电工技术学报,2007,22(12):84-90.
LIU Hongshun, LI Qingmin, JIANG Jie, et al. Impact of inductive

- FCL on the RRRV of circuit breakers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(12): 84-90.
- [11] 西安高压电器研究所. GB1984—2003 高压交流断路器[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
- [12] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T14824—2008 高压交流发电机断路器[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [13] IEEE. IEEE Std C37.013-1997 IEEE standard for AC high voltage generator circuit breakers rated on a symmetrical current basis [S]. [S.l.]: IEEE, 1997.
- [14] 张万荣, 赵伯楠, 苟锐锋. 发电机出口真空断路器瞬态恢复电压的研究[J]. 高压电器, 2000, 34(4): 15-18.
- ZHANG Wanrong, ZHAO Bonan, GOU Ruifeng. Study on transient recovery voltage of generator circuit breakers[J]. High Voltage Apparatus, 2000, 34(4): 15-18.
- [15] ZEINELDIN H H, EL-SAADANY E F, SALAMA M M A, et al. High voltage circuit breaker modeling for online model-based monitoring and diagnosis [C] // Conference of Innovations in Information Technology. Dubai, UAE: [s.n.], 2007: 317-321.
- [16] RAUL M, MARLEY B, VERNON C, et al. Resistance of spark channel[J]. IEEE Trans on Plasma Sci, 2006, 34(5): 1610-1619.
- [17] SCHAVEMAKER P H, van der LOU SLUIS. An improved mayr-type arc model based on current-zero measurements [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(2): 580-584.
- [18] 林莘, 王娜, 徐建源. 动态电弧模型下特快速瞬态过电压特性的计算与分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(16): 157-164.
- LIN Xin, WANG Na, XU Jianyuan. Calculation and analysis of very fast transient over-voltage characteristic on the condition of dynamic arcing model[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16): 157-164.
- [19] 黄绍平, 杨青, 李靖. 基于 MATLAB 的电弧模型仿真[J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17(5): 64-66.
- HUANG Shaoping, YANG Qing, LI Jing. Simulation of arc models based on MATLAB[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2005, 17(5): 64-66.
- [20] 顾雪晨. 基于 EMTDC/PSCAD 的断路器仿真模型[J]. 低压电器, 2012, 12(2): 5-9.
- GU Xuechen. Simulation model of circuit breaker based on EMTDC/PSCAD[J]. Low Voltage Apparatus, 2012, 12(2): 5-9.

作者简介:



刘渝根

刘渝根(1963—), 男, 重庆人, 教授, 长期从事高电压工程、电力系统过电压与接地技术的教学和科研工作 (E-mail: cqylyg@163.com);

米宏伟(1990—), 男, 河南信阳人, 硕士研究生, 主要从事电力系统过电压与接地技术方面的研究 (E-mail: mihongwei2008@163.com)。

Transient recovery voltage of circuit breaker at small-capacity generator outlet during three-phase short circuit

LIU Yugen, MI Hongwei

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The TRV (Transient Recovery Voltage) of outlet circuit breaker for generator with 12 to 30 MW capacity under the worst open condition is calculated and analyzed with PSCAD/EMTDC software, and its rising rate is used to deduce the condition that the distribution circuit breaker, instead of the generator circuit breaker, can be installed at the outlet of generator. The calculative results indicate: during the three-phase short circuit of generator outlet, the generator circuit breaker can be replaced by the distribution circuit breaker only when the generator capacity is 12 to 24 MW, while during the three-phase short circuit of transformer low-voltage outlet, the generator circuit breaker can also be replaced by the distribution circuit breaker when the generator capacity is 12 to 30 MW. The manual calculation formula of TRV is given.

Key words: small-capacity generator; distribution circuit breaker; generator circuit breaker; three-phase short circuit fault; transient recovery voltage; electric circuit breakers; models