文章编号：1000-3673（2026）01-0221-10　　中图分类号：TM 721　　文献标志码：A　　学科代码：470·40

大容量同步发电机源故障分析与开断需求

温伟杰[1,2]，范晶涵[1,2]，靳鹤志[3]，王晓远[1,2]，李斌[1,2]

（1．智能电网教育部重点实验室(天津大学)，天津市 南开区 300072；
2．国家储能技术产教融合创新平台(天津大学)，天津市 南开区 300072；
3．国网冀北电力有限公司廊坊供电公司，河北省 廊坊市 065001）

Analysis and Breaking Requirements of Fault Current Fed by High-capacity Synchronous Generator

WEN Weijie[1,2], FAN Jinghan[1,2], JIN Hezhi[3], WANG Xiaoyuan[1,2], LI Bin[1,2]

(1. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education (Tianjin University), Nankai District, Tianjin 300072, China;
2. National Industry-education Platform of Energy Storage (Tianjin University), Nankai District, Tianjin 300072, China;
3. State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Langfang Power Supply Company, Langfang 065001, Hebei Province, China)

ABSTRACT: The existing high-capacity generator circuit breaker (GCB) relies on SF_6 arc extinguishing technology, which is not environmentally friendly, has slow breaking speed, and has been monopolized by foreign companies. To clarify the requirements of large-capacity GCB at the system level and guide the development of environmentally friendly GCB, this paper studies the mechanism of delayed current zero appearing in the fault current fed by the large synchronous generator. It is found that the strong magnetic coupling effect between damping winding and stator winding is the main cause of delayed current zero, rather than the traditional thinking of high reactance to resistance ratio (X/R); The influence of damping winding material, fault phase angle, excitation state and speed on the amplitude and delayed current zero of the fault current is revealed. Taking a 1200MW practical nuclear power unit as an example, a simulation model based on the finite element method is constructed to verify relevant findings. The special requirements of large-capacity GCB are summarized. The research conclusions can guide and guide developing environmentally friendly large-capacity GCB.

KEY WORDS: fault current; delayed current zero; generator circuit breaker; damping of direct current

摘要：现有大容量发电机断路器(generator circuit breaker，GCB)采用 SF_6 气体灭弧，存在不环保、开断速度慢、长期被国外技术垄断等问题。为从系统层面厘清大容量同步发电机源故障电流特点及其对 GCB 的开断需求，该文研究了大容量发电机源故障电流特有的延时过零机理，发现阻尼绕组与定子绕组间的强磁耦合作用是导致故障电流延时过零的根本原因，而非传统认知的高电抗/电阻比值(X/R)；揭示了阻尼绕组材料、故障相位角、励磁状态、转速等对故障电流幅值和延时过零等特性的影响规律。以实际工程应用的 1200MW 核电机组为例，构建了其有限元仿真模型，对相关研究结论进行了仿真验证，总结归纳出环保型大容量 GCB 的特殊开断需求。研究结论可为研发环保型大容量快速 GCB 提供指导和依据。

关键词：故障电流；延时过零；发电机断路器；直流阻尼

DOI：10.13335/j.1000-3673.pst.2024.1734

0　引言

由于运行效率高、单位发电成本低等优点，大容量同步发电机被广泛应用在发电厂中[1-3]。为提高发变组保护水平、简化厂用电系统，通常在发电机与升压变压器间装设发电机断路器(generator circuit breaker，GCB)[4-6]。

以 1200MW 核电机组为例，要求 GCB 额定电流为 30kA (与线路故障电流为同一量级)，额定开断电流峰值超 250kA；极高的额定电流和故障电流对 GCB 的动热稳定性和开断容量提出挑战[7]。此外，不同于系统源故障电流的自然过零特性，发电机源故障电流可能在故障后数百个毫秒内不过零，表现出特有的延时过零现象。考虑电流零点是交流断路器开断电流的前提条件，发电机源故障电流的延时过零特性对 GCB 的直流分量阻尼能力提出特殊需求[8-9]。

针对大容量发电机源故障电流的延时过零现象，传统认为是由定子回路的高电抗 X/电阻 R(时间常数大)、直流分量衰减慢导致的[10-13]。基于该认

基金项目：国家重点研发计划项目(2022YFB2403601)。

Project Supported by National Key Research and Development Program of China (2022YFB2403601).

识，目前大容量 GCB 采用 SF_6 灭弧室，利用 SF_6 气体的高电弧电阻(电弧电压可达数 kV)来增大定子回路电阻、加速直流分量衰减、迫使电流快速过零，以确保故障开断[1, 14-17]。

然而，SF_6 是强温室气体，欧盟、美国等已相继宣布将在 2031~2033 年禁止新装 SF_6 气体开关[18]。此外，大容量发电机源故障电流的弧后瞬态恢复电压(transient recovery voltage，TRV)极高，可能导致 SF_6 电弧在电流过零后重新击穿[19]。为应对高 TRV，文献[20]提出了一种装设有换流支路的 SF_6 型 GCB 拓扑，可以降低 SF_6 断口的燃弧能量和弧后 TRV。但这种拓扑仍使用 SF_6 气体，会加剧温室效应，需要寻找环保型 GCB 方案替代 SF_6 的使用。

真空灭弧室具有弧后介质强度恢复迅速、维护方便的优点[21-23]，被认为具备应用于大容量 GCB 的潜力[24]，目前已有诸多学者针对真空型 GCB 的扩容问题进行了研究[25-28]。如文献[28]提出了一种大容量真空型 GCB 拓扑，采用 6 个真空灭弧室并联分流，并优化了均流效果，有效扩大了真空型 GCB 的容量。但当故障电流延时过零时，真空灭弧室会长时间燃弧，导致开断失败。

为了确保环保型大容量 GCB 的可靠开断，需要从系统层面厘清 GCB 的开断需求，明确发电机源故障电流特性及影响因素。目前，发电机源故障电流分析方法主要有两种：

1）采用 Simulink、PSCAD/EMTDC 等商用软件建立同步发电机的电磁暂态仿真模型，通过直接求解封装在模型内的微分方程，对故障电流进行数值计算[29-31]。但该方法无法直观分析发电机内部组件尺寸、材料等对故障电流的作用机理，不利于明晰延时过零等现象产生的根本原因。

2）通过经典解析计算方法，基于派克变换，将电机内部磁路等效为电路模型求解故障电流[32]。通过发电机次暂态电抗 x''_d、暂态电抗 x'_d 和同步电抗 x_d 等参数反映故障后不同阶段发电机内部磁场分布，推导故障电流的解析表达式[33-35]。但在解析式的推导过程中，电机铁心饱和程度、绕组电阻、转速等因素常被忽略，可能导致计算误差[36]。更为重要的是，采用解析计算法不能直观分析绕组间磁耦合、励磁状态、转速等非电量因素对故障电流的影响。

基于前人研究，该文借助经典解析计算方法，阐明了发电机源故障电流的组成分量及特点，并指出了该方法的固有缺陷。进一步，从数学上证明了传统认为高 X/R 引发电流延时过零的漏洞。首次从绕组间磁耦合角度，揭示了阻尼绕组、励磁绕组分别对定子电流延时过零现象的加剧、削弱作用机理。随后，基于有限元方法，分析了阻尼绕组材料、故障相位角、励磁状态、转速等对故障电流的影响规律，为研发环保型大容量 GCB 提供指导和依据。最后，根据故障电流峰值极高的特点总结了 GCB 的并联均流需求和选相分断需求，根据延时过零的特点总结了 GCB 的直流开断需求，并提出了带有阻尼模块的 GCB 拓扑，有助于实现对 SF_6 型 GCB 的环保替代。

1 基于经典解析计算方法的发电机源故障电流特点分析

1.1 发电机源故障电流的经典解析计算方法

GCB 的安装位置如附录图 C1 所示。当 f_2 处发生短路时，GCB 需要开断发电机源故障电流。

同步发电机源故障电流的经典计算方法中，利用等效的自感和互感来反映电机内部磁场分布，发电机各绕组的磁链方程可表示为附录式(D1)。其中：ψ为穿越各绕组磁链；i 为各绕组电流；L 为绕组自感；M 为绕组间互感；下标 a、b、c、f、D、Q 分别对应定子 a、b、c 三相绕组、励磁绕组、直轴和交轴阻尼绕组。

当图 C1 中的 f_2 处发生短路时，为保持各绕组交链的磁通在故障瞬间恒定，故障后初期的主磁通路径由气隙主导，如附录图 C2(a)所示。随着阻尼绕组和励磁绕组中感应电流分量依次衰减完毕，主磁路由次暂态、暂态逐渐恢复至稳态，如图 C2(b)所示。

结合式(D1)与各绕组电压方程，忽略定子、励磁、阻尼绕组电阻，经派克变换可得到 $dq0$ 坐标系下故障瞬间电压变化产生的故障电流分量。与故障前的稳态电流叠加后，再经派克逆变换，得到 abc 坐标系下的全故障电流。以 a 相为例，故障电流可表示为附录式(D2)，其中：E 为发电机内电势；θ_0 为故障相位角，即故障时刻转子直轴与 a 相相轴的夹角，见图 C2(a)；x''_d、x'_d、x_d 分别为直轴次暂态电抗、直轴暂态电抗、直轴同步电抗；x''_q、x_q 分别为交轴次暂态电抗、交轴同步电抗；T''_d，T'_d、T_a 分别为次暂态、暂态和直流分量衰减时间常数。

b 相和 c 相故障电流形式与式(D2)类似，仅 θ_0 依次相差 2π/3 和 4π/3。

如图 C2 和附录图 C3 所示，故障后各阶段主磁通路径有所不同。次暂态阶段，主磁通路径包括直轴电枢反应电抗 x_{ad}、励磁绕组漏抗 $x_{f\sigma}$、阻尼绕组

漏抗 $x_{D\sigma}$ 组成的并联支路；暂态过渡阶段，主磁通路径包括 x_{ad} 和 $x_{f\sigma}$ 组成的并联支路；恢复至稳态后，主磁通路径为 x_{ad} 单路径。考虑定子漏抗 x_s 的影响后，x''_d，x'_d，x_d 可分别表示为附录式(D3-D5)。

由于主磁路电抗在 x''_d 和 x''_q 间周期性变化，表示直流分量 i_{a_DC} 衰减速度的 T_a 可近似为附录式(D6)。如附录图 C4 所示，从阻尼绕组侧和励磁绕组侧看入，表示次暂态分量、暂态分量衰减速度的 T''_d、T'_d 可由附录式(D7)和(D8)计算得到，其中：L_{DD}、L_{ff} 为阻尼绕组、励磁绕组磁场等效电感；R_D、R_f 为阻尼绕组、励磁绕组等效电阻。

1.2　故障电流特点

将实际 1200MW 发电机参数代入式(D2)，发电机源故障电流的典型波形及组成分量如附录图 C5 所示。需要说明，由于隐极发电机的 x''_d 与 x''_q 相等，图 C5 中故障电流不含倍频分量。详细发电机参数见附录表 B1。

如图 C5 所示，θ_0=0 时，a 相故障电流首峰值超过 250kA，首个电流零点出现在故障发生后的 T_0≈120ms，表现出严重的延时过零现象。

故障电流由直流分量和交流分量组成。其中，直流分量是为了维持故障瞬间绕组磁链守恒而感应出来的，且直流分量和交流分量的初始绝对值相等，二者之和为 0。在次暂态阶段，交流分量的衰减速度大于直流分量，二者间的差异导致故障电流出现延时过零。在暂态阶段，交流分量的衰减速度慢于直流分量，使二者在次暂态阶段产生的差值逐渐缩小，延时过零现象消失。

值得注意，延时过零最多只出现在定子绕组中的某一相，且随着故障相位角 θ_0 的变化，a、b、c 依次出现延时过零，如附录图 C6 所示。图 C6 中，以 θ_0 分别为 0、4π/3、2π/3 为例，仅 a 相、b 相、c 相会分别出现延时过零，且出现延时过零的相电流峰值远高于另外两相。

基于 1.1 节中的经典解析计算方法，只能用式(D2)中不同的 θ_0 来解释故障电流高首峰值和延时过零所在相位的变化，但却无法给出该现象背后的物理解释。考虑 θ_0 不同时，定子各相绕组与励磁(阻尼)绕组的相对位置不同，下面将从绕组间磁耦合角度揭示定子侧故障电流延时过零机理。

2　基于磁耦合作用的发电机源故障电流延时过零机理

2.1　X/R 值与延时过零的关系

以往研究认为高 X/R 值是延时过零的根本原因。为厘清 X/R 值与延时过零的关系，本节暂不考虑阻尼绕组和励磁绕组对定子绕组的磁耦合作用，对故障电流进行分析。以 θ_0=0 时 a 相发生短路为例，将 a 相定子绕组、励磁绕组和阻尼绕组的电压方程与式(D1)结合，得到状态方程(D9)。其中，互感 M_{af}、M_{aD} 与转子位置角 θ 有关，随转子旋转而周期性变化，如式(D10)所示。二者相对于时间 t 的导数可由式(D11)和(D12)表示。

在故障发生前的稳态阶段，励磁电流为幅值恒定的直流量(I_{f0})。在定子磁场与转子间没有转速差时，阻尼绕组中没有电流。在 I_{f0} 和 M_{af} 变化率的影响下，a 相定子绕组中感应出稳态基频负载电流 $i_{a_ac_\omega_con}$。

不考虑励磁绕组和阻尼绕组对定子绕组的磁耦合作用，励磁绕组和阻尼绕组内不会产生感应电流，且式(D9)中的 M_{af}、M_{aD} 和 $\mathrm{d}i_f/\mathrm{d}t$、$\mathrm{d}i_D/\mathrm{d}t$ 均为零。在此基础上，求解式(D9)，可得 a 相故障电流如式(D13)所示。其中：i_{a_dc0} 是维持电感 L_{aa} 磁链平衡感应出的直流分量，按照 LR 电路零输入响应的时间常数 T_a=L_{aa}/R_a 衰减；$i_{a_ac_\omega_con}$ 为幅值恒定的交流分量。

从绕组间动态耦合作用角度分析，随着转子旋转，励磁电流 I_{f0} 产生的磁通穿越定子绕组、按同步正弦角频率(ω)旋转，在定子绕组内感应出同步角频率的交流电流 $i_{a_ac_\omega_con}$。为了维持穿越闭合绕组的磁链守恒，定子绕组中感应出直流分量 i_{a_dc0}。

由于忽略了绕组间的耦合作用，此时的短路故障相当于三相交流线路发生近端短路，波形示意图如附录图 C7 所示[37]。为了保障故障发生瞬间 L_{aa} 电流不突变，$i_{a_ac_\omega_con}$ 和 i_{a_dc0} 的初始幅值相等。由式(D13)可知，高 X/R 值会增大时间常数 T_a，使直流分量 i_{a_dc0} 衰减缓慢。但由于稳态交流分量 $i_{a_ac_\omega_con}$ 的幅值恒定，随着时间推移，衰减后的直流分量幅值总是小于交流分量，并不会出现延时过零现象。因此，高 X/R 值并不是导致定子侧故障电流延时过零的根本原因。

以 M_{aD} 来表征阻尼绕组与定子绕组间的磁耦合作用，以 M_{af} 来表征励磁绕组与定子绕组间的磁耦合，下面分别讨论 M_{aD} 和 M_{af} 对定子侧故障电流的影响。

2.2　阻尼绕组对定子侧故障电流的影响

为明确阻尼绕组对定子侧故障电流的影响，本节暂时忽略励磁绕组电流及其变化率的影响，即令式(D9)中的 i_f=0、$\mathrm{d}i_f/\mathrm{d}t$=0。此时，阻尼绕组和 a 相定子绕组的电压方程可表示为式(D14)和(D15)。

将式(D10)、(D12)、(D13)代入式(D14)、(D15)，阻尼绕组电流 i_D 和定子绕组电流 i_a 可分别表示为式(D16)和(D17)。其中：T_D 为阻尼绕组等效时间常数，约等于 T''_d；I_{D_dc} 和 I_{a_dc} 分别是阻尼绕组和定子绕组中直流分量的初始值；$I_{D_ac_\omega s}$、$I_{D_ac_\omega c}$ 和 $I_{a_ac_\omega s}$、$I_{a_ac_\omega c}$ 分别是阻尼绕组和定子绕组中两个基频交流分量的初始幅值；$I_{a_ac_2\omega s}$ 和 $I_{a_ac_2\omega c}$ 是定子绕组中两个倍频交流分量的初始幅值。具体推导过程及表达式见附录式(A1)—(A14)。

由式(D16)、(D17)可知，i_D 的直流分量与 i_a 的基频交流分量衰减速度相同，均按时间常数 T_D 衰减；而 i_D 的交流分量与 i_a 的直流、倍频交流分量衰减速度相同，均按时间常数 T_a 衰减。此外，为确保绕组中电流不会突变，在定子绕组和阻尼绕组中，直流分量和交流分量的初始幅值相等，即满足式(D18)。

从绕组间动态耦合作用角度分析，定子绕组直流分量 i_{a_dc0} 产生的空间静止磁链穿越旋转的阻尼绕组，在阻尼绕组中感应出交流分量 $i_{D_ac_\omega}$。由于阻尼绕组为闭合绕组，阻尼绕组中感应出直流分量 i_{D_dc} 以维持磁链守恒。阻尼绕组直流分量 i_{D_dc} 产生的磁通穿越定子绕组，在定子绕组中感应出额外的交流增量 $i_{a_ac_D\omega}$。为了维持定子绕组磁链守恒，定子绕组内感应出直流增量 $i_{a_dc_D}$。$i_{a_dc_D}$ 与 2.1 节中的 i_{a_dc0} 共同构成了式(D16)—(D18)中的 i_{a_dc}。

阻尼绕组交流分量 $i_{D_ac_\omega}$ 产生的基波磁动势可被分解为一对以同步角速度相对转子正向和反向旋转的磁场。当转子直轴、交轴磁路磁导不相等时，正向旋转的磁场在定子绕组中感应出二倍同步角频率的交流电流 $i_{a_ac_2\omega}$。

比较式(D17)与(D13)，考虑阻尼绕组磁耦合作用后，定子侧故障电流式(D17)中的直流和交流分量均会衰减，且衰减速度不同。实际大容量发电机中，阻尼绕组的时间常数 $T_D(\approx T''_d)$ 通常比定子绕组的时间常数 T_a 小一个数量级，意味着定子侧故障电流的交流分量衰减速度大于直流分量。随着时间推移，交流分量的幅值小于直流分量，定子侧故障电流无法过零。因此，阻尼绕组对定子侧故障电流的延时过零有加剧作用，阻尼绕组与定子绕组的磁耦合作用才是延时过零产生的根本原因。

2.3 励磁绕组对定子侧故障电流的影响

为明确励磁绕组对定子侧故障电流的影响，本节暂时忽略阻尼绕组电流及其变化率的影响，即令式(D9)中的 i_D=0、$\mathrm{d}i_D/\mathrm{d}t$=0。此时，励磁绕组和 a 相定子绕组的电压方程可表示为式(D19)和(D20)。

将式(D10)、(D11)、(D13)代入式(D19)、(D20)，励磁绕组电流 i_f 和定子绕组电流 i_a 可分别表示为式(D21)和(D22)，其中：T_f 为励磁绕组等效时间常数，约等于 T'_d；I_{f0} 为励磁系统提供的稳态直流励磁电流，幅值恒定；$I_{a_ac_\omega s_con}$、$I_{a_ac_\omega c_con}$ 是由 I_{f0} 在定子绕组中感应出的两个稳态交流分量的幅值；其余符号含义与式(D16)、(D17)类似，区别在于式(D19)、(D20)中的分量是由励磁绕组磁耦合作用产生的。具体推导过程及表达式见附录式(A15)—(A31)。

与阻尼绕组类似，励磁绕组也是转子上的闭合绕组，因此励磁绕组与定子绕组间的动态耦合作用可类比 2.2 节中阻尼绕组与定子绕组间的作用。

与 2.2 节中的分析类似，考虑励磁绕组磁耦合作用后，定子侧故障电流式(D22)的直流、交流分量也会按不同速度衰减。但不同于 $T_D(\approx T''_d)$，实际大容量发电机的时间常数 $T_f(\approx T'_d)$ 通常比 T_a 大一个数量级，使得定子侧故障电流中的交流分量衰减速度慢于直流分量。随着时间推移，交流分量的幅值逐渐大于直流分量，使电流在每个工频周期内都可以过零。因此，励磁绕组对定子侧故障电流的延时过零有削弱作用。

2.4 发电机源故障电流过零的约束条件

同时考虑阻尼绕组和励磁绕组对定子绕组的磁耦合作用，故障电流中各分量的幅值和变化规律如附录图 C8 所示。

图 C8 中，定子侧故障电流分为直流和交流分量，分别包含两部分：由阻尼绕组、励磁绕组磁耦合作用产生的直流分量 i_{dc_D}、i_{dc_f}；由阻尼绕组、励磁绕组磁耦合作用产生的交流分量 i_{ac_D}、i_{ac_f}。

如前所述，为确保各绕组电流不发生突变，故障电流直流分量、交流分量的初始幅值相等。因此，图 C8 中绕组磁耦合作用产生的直流分量初始值(I_{dc_f}、I_{dc_D})分别与交流分量初始幅值(I_{ac_f}、I_{ac_D})有式(1)所示的关系。

$$I_{dc_f}+I_{dc_D}=I_{ac_f}+I_{ac_D} \tag{1}$$

虽然直流分量、交流分量的初始幅值相同，但由式(D17)和(D22)可知，直流分量 i_{dc_f}、i_{dc_D} 均按时间常数 T_a 的衰减，而交流分量 i_{ac_D} 按 $T_D(\approx T''_d)$ 衰减，i_{ac_f} 按 $T_f(\approx T'_d)$ 衰减。

根据附录表 B1 中的实际参数，T''_d、T'_d、T_a 分别为 0.035、1.464、0.291s。因此，在故障后初期，i_{ac_D} 衰减速度快，交流分量(i_{ac_D}+i_{ac_f})的衰减速度主要取决于 T''_d，快于直流分量。但 i_{ac_D} 衰减完毕后，交流分量的衰减速度取决于 T'_d，慢于直流分量。当直流分量的总衰减量Δi_{dc} 小于交流分量的总衰减量

Δi_{ac}时，故障电流就会无法过零。

直流分量衰减量Δi_{dc}和交流分量衰减量(Δi_{ac_D}、Δi_{ac_f})的变化规律如附录图 C9 所示。在 T_0时刻，延时过零消失。由此，发电机源故障电流过零的约束条件如式(2)所示。

$$\Delta i_{dc} \geq \Delta i_{ac_D} + \Delta i_{ac_f} \tag{2}$$

故障后 T_0 时刻后满足式(2)，电流在后续的工频周期内自然过零，电流不过零现象消失。

总结而言，延时过零是不同电流分量随时间的衰减引起的，与各分量的初始值和衰减速度密切相关。只要满足约束式(2)，故障电流就会周期性过零。

3　发电机源故障电流影响因素及仿真

如前所述，传统电磁暂态仿真方法和经典解析计算方法无法分析绕组材料、铁心饱和状态、转速等非电量因素的影响，本节采用有限元建立大型同步发电机的多物理场仿真模型，分析发电机源故障电流的影响因素，厘清大容量 GCB 的系统需求。

3.1　阻尼绕组的影响及仿真分析

根据 2.2 节中的分析，阻尼绕组时间常数$T_D(\approx T''_d)$对延时过零起关键作用。本节对阻尼绕组参数与故障电流间的关系做进一步分析。

大容量同步发电机常设计有阻尼绕组，用于抑制负序电流，并在转子速度偏离同步转速时削弱其与定子旋转磁场间的转速差，提高运行稳定性。阻尼绕组通常由转子槽楔中的导体棒自然形成，在结构上相当于在励磁绕组外叠加的鼠笼环，如附录图 C10 所示。

3.1.1　阻尼绕组时间常数及其对故障电流的影响

为得到阻尼绕组的等效时间常数，需要对其笼型结构进行附录图 C11 所示的星三角等效变换。折算后的阻尼绕组等效时间常数可表示为式(3)。

$$\begin{cases} T_D = L_{DD}/r_D \approx T''_d \\ r_D = r_B + 2r'_R = r_B + \dfrac{r_R}{2\sin^2\dfrac{p\pi}{N}} \end{cases} \tag{3}$$

其中：r_B为每根阻尼条的电阻；r_R为每段阻尼端环的电阻；p 为转子极对数；N 为阻尼条总数。

对于物理尺寸已确定的发电机，转子槽楔的形状不能改变，但可以通过更换材料来改变 T_D。

阻尼绕组的自感 L_{DD} 由其结构尺寸和周围材料导磁性能决定，在电机物理尺寸确定的情况下不会改变。但阻尼绕组电阻与材料电导率σ成反比。因此，阻尼绕组材料电导率σ越高，式(3)中的 $T_D(\approx T''_d)$越大，阻尼绕组磁耦合作用在定子绕组中产生的电流分量 i_{ac_D} 衰减速度越慢。为探讨电导率对定子侧故障电流延时过零的影响，本节采用附录表 B2 中所示的 5 种情况进行分析。

理论上，σ越小则 $T_D(\approx T''_d)$越大，意味着 i_{ac_D} 衰减越慢，越容易满足式(2)。进一步，在 i_{ac_D} 的衰减速度慢于直流分量的情况下，整个故障过程中均满足式(2)，完全不会出现延时过零。然而，此时的交流分量与直流分量的衰减速度均较慢，叠加后的总故障电流衰减缓慢，导致故障电流较长时间内维持高幅值。

反之，σ越大则 $T_D(\approx T''_d)$越小，i_{ac_D} 衰减迅速，即 i_{ac_D} 可在$(3\sim5)\cdot T''_d$内衰减完毕。尽管在次暂态阶段，i_{ac_D} 的衰减速度大于直流分量，但 i_{ac_D} 的初始幅值 I_{ac_D} 受到大电导率σ的限制，使Δi_{ac_D} 的最大值减小，更容易满足式(2)，进而有利于消除延时过零。

总结而言，理论上，当σ极大或极小时，故障电流均不会出现延时过零。相较于σ极小的情况，σ极大时，总故障电流快速衰减，首峰值更低。

3.1.2　仿真验证

针对阻尼绕组材料电导率对故障电流延时过零和首峰值的影响进行验证。基于附录表 B1 的 1200MW 发电机搭建有限元仿真模型。模型采用矢量磁位边界条件，设置发电机定子铁心外边界的磁失位值为 0。为了体现故障电流的最严重情况(即 GCB 需应对的最苛刻工况)，设置故障前发电机处于空载状态且故障发生在定子三相绕组的出线端口。在阻尼绕组结构尺寸固定的情况下，采用表 B2 中的不同材料构造阻尼绕组进行仿真，几种材料的电导率σ关系为式(4)。

$$\sigma_{stainless_steel} < \sigma_{brass} < \sigma_{6061} < \sigma_{7075} < \sigma_{copper} < \sigma_{superconducting} \tag{4}$$

同时，为验证σ极大或极小对延时过零的消除作用，对阻尼绕组材料电导率σ=5.8E8(超导)和σ=0(无阻尼绕组)的情况进行仿真。值得注意，目前超导材料在实际应用时仍受诸多环境因素限制，尚无σ=5.8E8 的材料能够被应用于电机绕组中，此处仅为理想状态下仿真验证。

基于上述不同电导率的阻尼绕组，对发电机在θ_0=0 时发生三相短路的故障电流进行仿真计算，a 相故障电流结果如附录图 C12 所示。

仿真结果表明：与前述理论分析一致，当阻尼绕组的电导率极高(σ=5.8E8)时，T''_d(=0.350s)大于T_a (=0.291s)，阻尼绕组磁耦合作用产生的交流分量 i_{ac_D} 衰减缓慢，整个故障过程均能满足式(2)，故障

电流不会延时过零。同时，i_{ac_D} 的缓慢衰减使交流分量长时间维持高幅值，故障电流首峰值高达275kA；而当阻尼绕组采用低电导率材料(如不锈钢)时，T''_d(=0.001s)远小于 T_a(=0.291s)，i_{ac_D} 衰减迅速，故障电流首峰值仅为 232kA。而且，低电导率σ使 Δi_{ac_D} 的最大值被限制在较低水平，同样满足式(2)，不会出现延时过零。

此外，在不装设阻尼绕组的情况下(σ=0)，阻尼绕组磁耦合作用不存在，定子侧故障电流中没有由阻尼绕组感应出的分量，故不会出现延时过零，且电流首峰值最小，仅为 225kA。正是因为没有阻尼绕组，小容量发电机源故障电流不存在延时过零现象，可采用真空型 GCB 在 1~2 个工频周期内开断故障电流。

3.2 故障相位角的影响及仿真分析

如第 1 节所述，故障时刻转子直轴与 a 相相轴间的夹角，即故障相位角 θ_0，会影响延时过零和高首峰值所在相，但并未给出其物理解释。本节基于绕组间磁耦合作用，对 θ_0 与延时过零和首峰值的关系做进一步分析。

3.2.1 故障相位角对故障电流的影响

基于 2.2 和 2.3 节的分析，绕组磁耦合作用产生的故障电流分量可分为两部分，即与阻尼绕组磁耦合作用强度正相关的分量 i_{dc_D}、i_{ac_D}，和与励磁绕组磁耦合作用强度正相关的分量 i_{dc_f}、i_{ac_f}。

当故障相位角 $\theta_0=k\pi$ 时，如附录图 C13 所示，故障发生时刻转子直轴恰与 a 相相轴重合，阻尼绕组、励磁绕组、a 相定子绕组的磁通路径几乎完全重合。三相定子绕组与阻尼绕组、励磁绕组间的互感如公式(5)所示，可知在 $\theta_0=k\pi$ 时刻，互感 M_{af}、M_{aD} 达到最大值。

$$\begin{cases} M_{af}=L_{af}\cos\theta_0,\ M_{aD}=L_{aD}\cos\theta_0 \\ M_{bf}=L_{bf}\cos(\theta_0-2\pi/3),\ M_{bD}=L_{bD}\cos(\theta_0-2\pi/3) \\ M_{cf}=L_{cf}\cos(\theta_0+2\pi/3),\ M_{cD}=L_{cD}\cos(\theta_0+2\pi/3) \end{cases} \tag{5}$$

式(5)中的互感代表了相应绕组间的磁耦合作用强度。此时($\theta_0=k\pi$)，阻尼绕组、励磁绕组对 a 相定子绕组的磁耦合作用最强，感应出的电流分量 i_{dc_D}、i_{ac_D} 和 i_{dc_f}、i_{ac_f} 具有最大幅值，使 a 相故障电流出现极高的首峰值。同时，i_{ac_D} 的增大也使 Δi_{ac_D} 的最大值增大，导致 a 相故障电流出现严重延时过零。

类似地，$\theta_0=\pi/3+k\pi$ 时，转子直轴恰与 c 相相轴重合，磁耦合作用在 c 相绕组中感应出的电流分量幅值最高，c 相故障电流出现极高的首峰值和延时过零；$\theta_0=2\pi/3+k\pi$ 时，b 相故障电流出现极高的首峰值和延时过零。

3.2.2 仿真验证

针对故障相位角 θ_0 与故障电流首峰值和延时过零时长 T_0 的关系进行验证。

基于附录表 B1 的发电机搭建有限元模型，对不同 θ_0 下的故障电流进行仿真计算，结果如附录图 C14 所示。图 C14(b)为θ_0 与首峰值的关系，图 C14(c)为θ_0 与 T_0 的关系。

仿真结果表明：与前述理论分析一致，故障电流的首峰值和延时过零时长 T_0 与绕组磁耦合作用强度正相关。在一些特殊的故障相位角，如 $\theta_0=\pi/6$ 时，式(5)中的互感均较小，励磁绕组、阻尼绕组对三相定子绕组的磁耦合作用较弱，三相故障电流的首峰值均较低且不会延时过零；与之相反，以 $\theta_0=0$ 为例，式(5)中的互感 M_{af}、M_{aD} 达到最大值，励磁绕组、阻尼绕组对 a 相定子绕组的磁耦合作用最强，a 相故障电流出现极高首峰值和延时过零。

上述首峰值和延时过零时长及其所在相位变化的根本原因是互感 M_{af} 和 M_{aD} (M_{bf} 和 M_{bD}、M_{cf} 和 M_{cD})随 θ_0 变化，改变了励磁绕组、阻尼绕组对 a 相(b 相、c 相)定子绕组的磁耦合作用强度，使三相电流交替出现高首峰值和延时过零。

3.3 发电机励磁状态的影响及仿真分析

实际运行中的发电机，为维持机端电压恒定，在感性负载时需要增大励磁电流，使发电机工作在过励磁状态；在容性负载时需要减小励磁电流，使发电机工作在欠励磁状态。在分析发电机源故障电流时需要考虑不同的励磁状态，经典解析计算法无法适用，本节采用有限元法。

3.3.1 励磁状态对故障电流幅值的影响

励磁电流增大会使发电机转子铁心内磁场饱和程度加重，如附录图 C15(b)所示。

在故障初期(次暂态阶段)，故障电流的幅值由次暂态阶段主磁路等效电抗和发电机内电势 E 决定，下面分别进行分析。

由 1.1 节图 C3 可知，次暂态阶段主磁路等效电抗由定子漏抗 x_s 与一个并联支路串联组成，该并联支路由直轴电枢反应电抗 x_{ad}、励磁绕组漏抗 $x_{f\sigma}$、阻尼绕组漏抗 $x_{D\sigma}$ 构成。其中，直轴电枢反应电抗 x_{ad} 对应的磁通路径会穿越转子铁心。铁心饱和程度加重后，铁心磁导率 μ 下降，使 x_{ad} 减小。然而，定子漏抗 x_s 对应的磁通路径并不穿越转子铁心，不受磁导率 μ 改变的影响。同时，与 x_s 相比，$x_{f\sigma}$ 和 $x_{D\sigma}$ 的值很小，由 x_{ad}、$x_{f\sigma}$、$x_{D\sigma}$ 组成的并联支路对主

磁路等效电抗的影响很弱。因此，次暂态阶段内，主磁路等效电抗主要由 x_s 决定，基本不受铁心饱和程度影响，与励磁状态无关。

对于发电机内电势 E，由 1.1 节图 2(b)可知，故障前稳态情况下的主磁通主要流经转子铁心。当铁心不饱和时，E 与稳态励磁电流 I_{f0} 成正比。而当 I_{f0} 增大使转子铁心进入饱和区后，磁导率 μ 的降低使 E 不再与 I_{f0} 成正比，而是按相应范围内的铁心磁化曲线规律变化。

故障电流幅值与 E 成正比，因此电流幅值与 I_{f0} 间的关系也参照铁心磁化曲线，即取决于磁导率 μ 的变化规律。

根据国家标准[38]，励磁系统的顶值电流不超过 2 倍额定励磁电流。而发电机最小励磁电流取决于其稳态运行极限。鉴于不同发电机的稳态运行极限不同，难以确定统一的最小励磁电流值。此处对励磁电流为 0 至 2 倍额定励磁电流范围内的情况进行有限元仿真计算，得到励磁电流 I_{f0} 和故障电流首峰值的关系结果如附录图 C16 所示。

图 C16 中，故障电流首峰值与励磁电流 I_{f0} 正相关，且受铁心磁导率 μ 的影响，二者的关系与铁心磁化曲线在膝点附近的变化规律类似。

因此，当励磁电流增大使转子铁心进入饱和后，故障电流首峰值不再与励磁电流成正比，而是参照相应铁心磁化曲线的规律发生变化。

3.3.2　励磁状态对延时过零的影响

欠励磁状态下，一方面，次暂态阶段转子铁心内磁场饱和程度减弱，铁心磁导率 μ 升高，与 μ 成正比的互感 M_{aD} 增大，使阻尼绕组对定子绕组的磁耦合作用增强；另一方面，次暂态阶段阻尼绕组等效电感 L''_{DD} 变大，使得 i_{ac_D} 衰减速度慢。综合两方面影响，在欠励磁时，随着励磁电流的增大，GCB 的直流开断需求呈现先增大后减小的趋势。

对 0~2pu 励磁电流进行有限元仿真，结果如附录图 C17 所示。其中，图 C17(a)为励磁电流 I_{f0} 和直流开断需求的关系，图 C17(b)为励磁电流为 0.6pu 和 1pu 时的故障电流时域波形。

图 C17 中，当励磁电流为 0~0.6pu 范围时，随励磁电流的增加，故障电流延时过零加剧，直流开断需求增大，并在约 0.6pu 励磁电流时出现最大值；而当励磁电流为 0.6~1pu 时，直流开断需求逐渐被削弱。以 0.6pu 励磁电流为例，故障电流延时过零时长为 0.20s，较额定工况延长了 0.08s；直流开断需求为 6.7kA，较额定励磁状态增大了 1.3kA。

因此，当发电机运行在欠励磁状态时，转子铁心饱和程度的削弱会增大铁心磁导率，使阻尼绕组对定子绕组的磁耦合作用增强，可能加剧延时过零现象，导致更高的 GCB 直流开断需求。

3.4　转速的影响及仿真分析

大型同步发电机组启动时需要缓慢加速至同步转速，经历数分钟级的低频启动阶段。当故障恰好发生在该阶段时，同样需要 GCB 及时开断故障电流。

由前述分析可知，同步转速下，定子侧故障电流延时过零时长由故障电流交、直流分量的幅值和衰减速度决定。然而，在发电机低频启动阶段，故障电流中的交流分量周期由转速决定(可能长达百毫秒)，低于 50Hz 工频周期。此时，在故障后的首个交流周期内，直流分量已充分衰减，但由于相邻交流零点的时间间隔极长，故障电流的首个零点出现时间大幅延后。因此，不同于同步转速工况，发电机低频启动过程中，故障电流延时过零主要是由过长的交流分量周期决定，而非交、直流分量的衰减速度差异。

低频启动阶段，发电机内电动势 E 与频率 f 成正比，如式(6)所示。

$$E = 4.44 f N \phi \tag{6}$$

其中：N 为定子绕组等效匝数；Φ 为故障前稳态阶段主磁通。

故障发生后，主磁路等效电抗 x 也与频率 f 成正比，如式(7)所示。

$$x = 2\pi f L \tag{7}$$

由 1.1 节式(D2)可知，故障电流计算过程中，E 与 x 中含有的频率因素 f 相互抵消。因此，与同步转速工况下的故障电流幅值相比，低频启动阶段的故障电流幅值并不会明显减小。

针对转速与故障电流延时过零时长 T_0 以及幅值的关系进行验证。对附录表 B1 的发电机分别在启动阶段(2Hz)和同步转速工况(50Hz)发生三相短路故障进行有限元仿真，a 相故障电流如附录图 C18 所示。

图 C18 中，当故障发生在低频启动阶段(2Hz)时，故障电流约在 0.25s 达到首峰值(约 200kA)，与同步转速工况(50Hz)在 0.25s 的幅值基本相等，说明转速的变化并未对故障电流幅值产生明显影响。此外，低频启动阶段(2Hz)的故障电流延时过零时长 T_0 为 0.395s，较同步转速工况(50Hz)下故障电流的首个零点出现时间延长了 0.275s。

由此可见，发电机低频启动阶段过程中的故障电流幅值与同步转速时相同，但由于交流分量周期

变长，导致定子侧故障电流延时过零。大容量 GCB 应考虑该工况的特殊需求。

3.5 不同因素对故障电流的影响总结

总结不同因素对故障电流首峰值和延时过零的影响如附录表 B3 所示，包括阻尼绕组电导率 σ、故障相位角 θ_0、励磁状态、转速的影响。

鉴于故障可能发生在任意工况，在设计和测试 GCB 时，必须要求 GCB 能够承受并开断表 B3 中所有情况下故障电流。

4 环保型大容量快速 GCB 的开断需求

大容量发电机源故障电流的高首峰值和延时过零等特性对 GCB 提出了不同于线路断路器的特殊开断需求。针对这些需求，本节给出环保型大容量快速 GCB 的相应技术要求，为打破国外对 SF_6 型大容量 GCB 的技术垄断提供理论基础。

4.1 并联均流需求和选相分断需求

以 1200MW 发电机为例，其额定电流约为 30kA，短路电流峰值超过 250kA，额定电压为 24kV。而目前尚无满足要求的环保型灭弧室。以真空灭弧室为例，与该电压等级对应的商用真空灭弧室的额定电流通常不超过 4kA(强迫冷却条件下)，开断电流不超过 50kA[39]。因此，若在 GCB 中采用真空等环保型灭弧室，则需要多个灭弧室并联来承担额定电流和故障电流。

此外，常规中压线路断路器(10、35kV)采用三相共用一套操动机构的三相联动方式。但这种方式无法被应用在环保型大容量 GCB 中，主要考虑无法满足以下 3 方面的需求：

1）常规线路断路器容量小、触头轻，由弹簧操动机构驱动，对分闸速度要求低(20~40ms)。但环保型大容量快速 GCB 容量大、触头重，且为了满足 2 个工频周期内的故障开断要求，必须采用电磁斥力机构。若仍采用三相联动方式，电磁斥力机构负载过重，操动速度不能满足要求。

2）三相电流的过零时刻不同，而三相联动方式在同一时刻分闸，导致零点距离分闸时刻较远的相位触头长时间燃弧，弧柱能量过高，不利于熄弧和可靠开断电流。

3）发电机低频启动阶段故障工况下，直流分量在百毫秒内衰减完毕后，故障电流为低频交流。此时弧柱能量的积累远高于额定工况，导致开断失败甚至灭弧室爆炸。以 ABB 公司 HECPS-3S 型 GCB 为例，GCB 开断能力与电流频率成反比，且在频率小于 20Hz 时，不具有开断能力。

综上，为适应环保型大容量 GCB 的特殊开断需求，应发展快速多个灭弧室并联均流和选相分断技术。在 GCB 中采用三相断路器分别配置电磁斥力操动机构的分相操动方法，配合电流零点预测技术，保障灭弧室只在电流零点前的 2~3ms 燃弧，缩短燃弧时间、降低弧柱能量，提高电流零点处的开断可靠性。

4.2 直流开断需求

大容量发电机源故障电流中的直流分量造成的延时过零现象对 GCB 提出直流开断需求。现有的 SF_6 型 GCB 利用 SF_6 电弧电压来阻尼直流分量衰减。为代替 SF_6 的使用，环保型 GCB 需配置单独的阻尼模块，来模拟 SF_6 电弧电压的阻尼衰减作用，如附录图 C19 所示。

阻尼模块可看作低压直流断路器，需要其在故障电流接近零点时将线性电阻或非线性电阻(避雷器)切入到故障回路中，主动阻尼直流分量的衰减，而阻尼模块投切时的电流即为其直流开断需求。本节采用故障后两个工频周期内电流相对零轴的最小偏移量表示 GCB 的直流开断需求(见 1.2 节图 C5)，不同θ_0、阻尼绕组材料条件下的 GCB 直流开断需求如附录图 C20 所示。

由图 C20 可知，对于某一次故障，延时过零只出现在某一相电流中，此时仅需要该相故障线路上的 GCB 阻尼模块动作。而实际中，故障可能出现在任意时刻，在θ_0 随机分布的情况下，延时过零的故障电流可能出现在任意相，且偏移量可能为正值或负值。为此，三相均应配置阻尼模块，且要求阻尼模块具备双向电流开断能力。

参考常见的直流断路器可知，阻尼模块的成本与其直流开断能力、电压等级等密切相关。由前述分析可知，阻尼模块的直流开断需求与阻尼绕组材料、励磁状态等密切相关；阻尼模块的暂态开断电压(等效电阻)与直流分量的衰减速度和电流零点的出现时间密切相关。上述需求共同决定了阻尼模块的拓扑结构和参数。

5 结论

该文从系统层面梳理了大容量 GCB 的开断需求。从磁耦合角度，指出阻尼绕组与定子绕组间的强磁耦合作用是故障电流延时过零的根本原因，并提出了改变阻尼绕组材料来调控故障电流的幅值和延时过零等特性。进一步，结合有限元仿真，研究了故障相位角、励磁状态、电机转速对故障电流的影响规律，主要研究结论如下：

1）随着故障相位角θ_0变化，延时过零至多出现在某一相故障电流中，其出现相位的改变由阻尼绕组与定子绕组间互感随θ_0的变化决定。

2）励磁电流的变化会影响发电机转子铁心饱和程度，使故障电流首峰值参照铁心磁化曲线规律变化；欠励磁状态下，阻尼绕组对定子绕组磁耦合作用的增强加剧延时过零现象，提出更高的直流开断需求。

3）发电机转速的降低并不会明显改变故障电流幅值，但会延长交流周期，显著加剧延时过零现象。

针对上述故障电流特性，展望未来环保型大容量 GCB 可由快速真空开关和阻尼模块组成。其中，阻尼模块为低压直流断路器，起到主动阻尼衰减直流分量，加速电流过零的作用；快速真空开关为最终的电流开断装置。未来研究应着重考虑阻尼模块的拓扑结构和参数设计，同时需要攻克并联均流和选相分断技术。

附录见本刊网络版(http://www.dwjs.com.cn/CN/1000-3673/current.shtml)。

参考文献

[1] 刘纯，赵牧驰，汪海蛟，等．新能源同步发电机序阻抗建模及其对宽频振荡的抑制作用[J]．电网技术．2024，48(9)：3595-3603．
LIU Chun，ZHAO Muchi，WANG Haijiao，et al．Modelling of sequence impedance of renewable energy synchronous generator and its suppression effect on broadband oscillation[J]．Power System Technology，2024，48(9)：3595-3603(in Chinese)．

[2] 黄俊杰，郭谋发，张彬隆．大型发电机定子接地故障柔性融合消弧方法[J]．电网技术．2024，48(11)：4748-4757．
HUANG Junjie，GUO Moufa，ZHANG Binlong．Flexible fusion arc suppression method for large generator stator ground fault[J]．Power System Technology，2024，48(11)：4748-4757(in Chinese)．

[3] 周嘉豪，王秀丽，张海涛，等．分频输电系统同步发电机端口三相短路引起的振荡转矩分析[J]．高电压技术，2024，50(5)：2020-2029．
ZHOU Jiahao，WANG Xiuli，ZHANG Haitao，et al．Analysis on oscillatory torques caused by three-phase short circuit in synchronous generator port based on fractional frequency transmission system[J]．High Voltage Engineering，2024，50(5)：2020-2029．

[4] HORST M，NECSULESCU G，ASAKAWA K，et al．Interruption phenomena and testing of very large SF_6 generator circuit breakers[C]//Session Materials．Paris：CIGRE，2014．

[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 (in Chinese)．

[6] DUFOURNET D，MONTILLET G F．Transient recovery voltages requirements for system source fault interrupting by small generator circuit breakers[J]．IEEE Transactions on Power Delivery，2002，17(2)：474-478．

[7] 朱琦琦，王海燕，张洋，等．大容量抽水蓄能发电机断路器发热特性仿真与散热优化方法[J]．高电压技术，2024，50(6)：2623-2634．
ZHU Qiqi，WANG Haiyan，ZHANG Yang，et al．Heating characteristic simulation and heat dissipation optimization design of pumped storage circuit breaker[J]．High Voltage Engineering，2024，50(6)：2623-2634(in Chinese)．

[8] PRASAD N R，HERLING S R．Three phase dynamic simulation of air blast generator circuit breakers -- theory and modeling[J]．IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems，1982，PAS-101(6)：1561-1569．

[9] 天津大学．一种环保型发电机出口断路器：202311267593.3[P]．2024-08-06．

[10] KULICKE B，SCHRAMM H H．Clearance of short-circuits with delayed current zeros in the Itaipu 550 kV-Substation[J]．IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems，1980，PAS-99(4)：1406-1414．

[11] COSSE R E，HAZEL T G，THOMASSET G．IEC medium-voltage circuit-breaker interrupting ratings - unstated short-circuit considerations[J]．IEEE Transactions on Industry Applications，2000，36(3)：884-892．

[12] 钱家骊．8 种电流零点延迟现象[J]．华通技术，2004(1)：18-20．
QIAN Jiali．The time delay phenomena of current zero by eight causes[J]．Huatong Technology，2004(1)：18-20(in Chinese)．

[13] 秦莹，穆焜．浅谈大型水电站元件时间常数和短路电流特点及其应用[C]//2010 年度电气学术交流会议论文集．北京：中国水电顾问集团成都勘测设计研究院，2010，126-132．

[14] SMEETS R P P，KERTESZ V，DUFOURNET D，et al．Interaction of a vacuum arc with an SF_6 arc in a hybrid circuit breaker during high-current interruption[J]．IEEE Transactions on Plasma Science，2007，35(4)：933-938．

[15] DUFOURNET D，WILLEME J M，MONTILLET G F，et al．Design and implementation of an SF_6 interrupting chamber applied to low range generator circuit breakers suitable for interruption of current having a non-zero passage[J]．IEEE Transactions on Power Delivery，2002，17(4)：963-968．

[16] KOHYAMA H，KAMEI K，YOSHIDA D，et al．Study of interrupting duties of delayed zero crossing current in generator main circuit[C]//CIGRE Auckland Symposium．Auckland，New Zealand，2013．

[17] 温伟杰，黄瑜珑，吕纲，等．应用于混合式直流断路器的电流转移方法[J]．高电压技术，2016，42(12)：4005-4012．
WEN Weijie，HUANG Yulong，LÜ Gang，et al．Current commutation method in hybrid DC circuit breaker[J]．High Voltage Engineering，2016，42(12)：4005-4012(in Chinese)．

[18] 高克利，杨圆，周文俊，等．SF_6替代型环保绝缘气体：研究、应用和展望[J]．中国电机工程学报，2024，44(18)：7395-7411．
GAO Keli，YANG Yuan，ZHOU Wenjun，et al．SF_6 alternative environmentally friendly insulating gas：research，application and outlook[J]．Proceedings of the CSEE，2024，44(18)：7395-7411(in Chinese)．

[19] 李辰辉，褚继峰，龙潇，等．基于弧触头接触振动特征分析的高压 SF_6 断路器电寿命在线监测方法[J]．电工技术学报，2024，39(15)：4883-4895．
LI Chenhui，CHU Jifeng，LONG Xiao，et al．Online monitoring method of electrical life of high voltage SF_6 circuit breaker based on analysis of arcing contact vibration characteristics[J]．Transactions of China Electrotechnical Society，2024，39(15)：4883-4895(in Chinese)．

[20] GAN Z Z，YU Z Q，QU L，et al．Generator circuit breaker based on pre-charged capacitor commutation and thyristor freewheeling[J]．IEEE Transactions on Power Delivery，2024，39(2)：718-727．

[21] 田阳，李志兵，田宇，等．高比例新能源接入下快速真空断路器

容性开合能力提升研究[J]．电网技术，2024，48(6)：2670-2679．
TIAN Yang，LI Zhibing，TIAN Yu，et al．Research on the improvement of capacitive opening and closing ability of fast circuit breaker under high proportion of new energy access[J]．Power System Technology，2024，48(6)：2670-2679(in Chinese)．

[22] 王华清，黄道春，双明镜，等．融合连续过渡模型与 Helmer 模型的真空断路器开断模型研究[J]．电网技术，2024，48(4)：1731-1741．
WANG Huaqing，HUANG Daochun，SHUANG Mingjing，et al．Interruption model of vacuum circuit breaker based on continuous transition model and helmer model[J]．Power System Technology，2024，48(4)：1731-1741(in Chinese)．

[23] 钟建英，孙广雷，杨葆鑫，等．高电压等级真空断路器研究现状及展望[J]．高电压技术，2024，50(2)：451-466．
ZHONG Jianying，SUN Guanglei，YANG Baoxin，et al．Research status and prospect of high voltage vacuum circuit breaker[J]．High Voltage Engineering，2024，50(2): 451-466．

[24] URBANEK H，VENNA K R，ANGER N．Vacuum circuit breakers—promising switching technology for pumped storage power plants up to 450 MVA[C]//2017 4th International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology (ICEPE-ST). Xi'an：IEEE，2017：107-112．

[25] 刘志远，王季梅，王仲奕，等．真空发电机断路器并联断口电流转移分析[J]．中国电机工程学报，2000，20(12)：21-23．
LIU Zhiyuan，WANG Jimei，WANG Zhongyi，et al．Current transfer process in open operation between paralleled breaks of a vacuum generator circuit breaker[J]．Proceedings of the CSEE，2000，20(12)：21-23(in Chinese)．

[26] 郑祥，邹积岩，程卓．并联型真空发电机断路器的电流转移过程[J]．高电压技术，2009，35(11)：2709-2715．
ZHENG Xiang，ZOU Jiyan，CHENG Zhuo．Current transfer process of paralleled vacuum generator circuit breaker[J]．High Voltage Engineering，2009，35(11)：2709-2715(in Chinese)．

[27] 费翔，张国跃，马明乐，等．大容量发电机出口真空灭弧室研制[J]．高电压技术，2022，48(11)：4488-4496．
FEI Xiang，ZHANG Guoyue，MA Mingle，et al．Development of vacuum interrupter at the outlet of large capacity generator[J]．High Voltage Engineering，2022，48(11)：4488-4496(in Chinese)．

[28] 韩翔宇，杨飞，陈洪斌，等．基于真空电弧伏安特性的大电流真空多断口并联动态均流特性[J/OL]．高电压技术，2024：1-11[2024-10-12]．https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20240758．
HAN Xiangyu，YANG Fei，CHEN Hongbin，et al．Dynamic current-sharing characteristics of high-current vacuum multi-breakers based on vacuum arc volt-ampere characteristics[J/OL]．High Voltage Engineering，2024：1-11[2024-10-12]．https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20240758(in Chinese)．

[29] GLINKOWSKI M T，GUTIERREZ M R，BRAUN D．Voltage escalation and reignition behavior of vacuum generator circuit breakers during load shedding[J]．IEEE Transactions on Power Delivery，1997，12(1)：219-226．

[30] DOMMEL H W．Electromagnetic transients program reference manual (EMTP) Theory Book[M]．Canada，BC：Bonneville Power Administration，1986．

[31] ABD EL-GHANY H A，AHMED E S，ELGEBALY A E．A reliable loss of excitation protection technique based on EPFA for synchronous generators[J]．IEEE Transactions on Power Delivery，2022，37(3)：1445-1455．

[32] 辜承林，陈乔夫，熊永前．电机学[M]．2 版．武汉：华中科技大学出版社，2005：288-386．

[33] FITZGERALD A E，KINGSLEY JR C，UMANS S U．Electric machinery[M]．New York：McGraw-Hill，2005．

[34] CHAPMAN S．Electric machinery fundamentals[M]．4th ed．New York：McGraw-Hill，2003．

[35] GUGALE P，PALAZZO M．Application of circuit-breaker standards in short-circuit current calculation for generator circuit-breakers[C]//2020 IEEE Electric Power and Energy Conference (EPEC)．Edmonton，AB：2020：1-8．

[36] 陈珩．同步电机运行基本理论与计算机算法[M]．北京：水利电力出版社，1992：75-110．

[37] 国家市场监督管理总局，国家标准化管理委员会．三相交流系统短路电流计算 第 1 部分：电流计算：GB/T 15544.1-2023[S]．北京：中国标准出版社，2023．

[38] 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．同步电机励磁系统大、中型同步发电机励磁系统技术要求：GB/T 7409.3-2007[S]．北京：中国标准出版社，2007．

[39] SIEMENS H G．Vacuum switching technology and components for medium voltage[EB/OL]．(2016-11-01)．https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:0550395ac2c0303ddc4fa49e6f3f4bdcea4b1be2/vacuum-switching-technology-and-components-for-medium-voltage-catalog-hg-11-01-2016-7548.pdf．



温伟杰

在线出版日期：2025-05-16。
收稿日期：2024-09-20。

作者简介：

温伟杰(1989)，女，副教授，硕士生导师，研究方向为故障分析与断路器装备，E-mail：weijie.wen@tju.edu.cn；

范晶涵(1999)，女，博士研究生，研究方向为发电机出口断路器、故障分析，E-mail：fanjh@tju.edu.cn；

靳鹤志(1999)，通信作者，女，工程师，研究方向为直流电网保护技术，E-mail：hezhijin@tju.edu.cn。

（责任编辑　李健一）

附录 A

仅考虑阻尼绕组与定子绕组间的磁耦合作用，阻尼绕组中电流分量的初始幅值如式(A1-A3)所示。

$$I_{\mathrm{D_dc}}=\mathrm{C}\quad(\mathrm{C\ is\ a\ constant}) \tag{A1}$$

$$I_{\mathrm{D_ac_}\omega\mathrm{s}}=-\frac{\omega L_{\mathrm{aD}}R_{\mathrm{D}}T_{\mathrm{a}}^{2}I_{\mathrm{a_dc0}}}{T_{\mathrm{a}}^{2}L_{\mathrm{DD}}^{2}\omega^{2}+(L_{\mathrm{DD}}-R_{\mathrm{D}}T_{\mathrm{l}})^{2}} \tag{A2}$$

$$I_{\mathrm{D_ac_}\omega\mathrm{c}}=\frac{R_{\mathrm{D}}T_{\mathrm{a}}-L_{\mathrm{DD}}-\omega^{2}T_{\mathrm{a}}^{2}L_{\mathrm{DD}}}{T_{\mathrm{a}}^{2}L_{\mathrm{DD}}^{2}\omega^{2}+(L_{\mathrm{DD}}-R_{\mathrm{D}}T_{\mathrm{l}})^{2}}L_{\mathrm{aD}}I_{\mathrm{a_dc0}} \tag{A3}$$

定子绕组中电流分量的初始幅值可以表示为式(A4-A8)，其中 x_1、x_2、x_3、x_4、x_5、y_1 分别为式(A9-14)。

$$I_{\mathrm{a_dc}}=\mathrm{C}+x_1/y_1\quad(\mathrm{C\ is\ a\ constant}) \tag{A4}$$

$$I_{\mathrm{a_ac_}\omega\mathrm{s}}=x_2/y_1 \tag{A5}$$

$$I_{\mathrm{a_ac_}\omega\mathrm{c}}=x_3/y_1 \tag{A6}$$

$$I_{\mathrm{a_ac_2}\omega\mathrm{s}}=x_4/y_1 \tag{A7}$$

$$I_{\mathrm{a_ac_2}\omega\mathrm{c}}=x_5/y_1 \tag{A8}$$

$$\begin{aligned}x_1=&8L_{\mathrm{aa}}^{4}L_{\mathrm{aD}}T_{\mathrm{a}}^{3}T_{\mathrm{D1}}^{2}I_{\mathrm{D_ac_}\omega\mathrm{s}}\omega^{5}-4L_{\mathrm{aa}}^{4}L_{\mathrm{aD}}T_{\mathrm{a}}^{2}T_{\mathrm{D1}}^{2}I_{\mathrm{D_ac_}\omega\mathrm{c}}\omega^{4}+\\&\begin{pmatrix}5T_{\mathrm{a}}^{2}T_{\mathrm{D1}}^{2}R_{\mathrm{a}}^{2}-8T_{\mathrm{a}}^{2}T_{\mathrm{D1}}L_{\mathrm{aa}}R_{\mathrm{a}}\\+4T_{\mathrm{a}}^{2}L_{\mathrm{aa}}^{2}-2T_{\mathrm{a}}T_{\mathrm{D1}}^{2}L_{\mathrm{aa}}R_{\mathrm{a}}+T_{\mathrm{D1}}^{2}L_{\mathrm{aa}}^{2}\end{pmatrix}\begin{pmatrix}2\omega T_{\mathrm{a}}I_{\mathrm{D_ac_}\omega\mathrm{s}}\\-I_{\mathrm{D_ac_}\omega\mathrm{c}}\end{pmatrix}\cdot\\&L_{\mathrm{aD}}L_{\mathrm{aa}}^{2}\omega^{2}+\begin{pmatrix}T_{\mathrm{a}}^{2}T_{\mathrm{D1}}^{2}R_{\mathrm{a}}^{4}-2L_{\mathrm{aa}}R_{\mathrm{a}}^{3}T_{\mathrm{a}}T_{\mathrm{D1}}^{2}\\+L_{\mathrm{aa}}^{2}R_{\mathrm{a}}^{2}T_{\mathrm{D1}}^{2}+4T_{\mathrm{a}}T_{\mathrm{D1}}L_{\mathrm{aa}}^{2}R_{\mathrm{a}}^{2}\\-2T_{\mathrm{D1}}L_{\mathrm{aa}}^{3}R_{\mathrm{a}}-2T_{\mathrm{a}}L_{\mathrm{aa}}^{3}R_{\mathrm{a}}+L_{\mathrm{aa}}^{4}\\-2L_{\mathrm{aa}}R_{\mathrm{a}}^{3}T_{\mathrm{a}}^{2}T_{\mathrm{D1}}+L_{\mathrm{aa}}^{2}R_{\mathrm{a}}^{2}T_{\mathrm{a}}^{2}\end{pmatrix}\cdot\\&\begin{pmatrix}I_{\mathrm{D_ac_}\omega\mathrm{s}}\\-2\omega T_{\mathrm{a}}I_{\mathrm{D_ac_}\omega\mathrm{c}}\end{pmatrix}L_{\mathrm{aD}}\end{aligned} \tag{A9}$$

$$x_2=\begin{bmatrix}(L_{\mathrm{aa}}-T_{\mathrm{a}}R_{\mathrm{a}})4L_{\mathrm{aa}}^{2}T_{\mathrm{a}}^{2}\omega^{3}\\-T_{\mathrm{a}}^{3}R_{\mathrm{a}}^{3}+3T_{\mathrm{a}}^{2}L_{\mathrm{aa}}R_{\mathrm{a}}^{2}\\-3T_{\mathrm{a}}L_{\mathrm{aa}}^{2}R_{\mathrm{a}}+L_{\mathrm{aa}}^{3}\end{bmatrix}2L_{\mathrm{aD}}I_{\mathrm{D_dc}}R_{\mathrm{a}}T_{\mathrm{D1}}^{2} \tag{A10}$$

$$\begin{aligned}x_3=&\begin{pmatrix}T_{\mathrm{a}}^{3}T_{\mathrm{D1}}^{2}R_{\mathrm{a}}^{3}-3T_{\mathrm{a}}^{2}T_{\mathrm{D1}}^{2}L_{\mathrm{aa}}R_{\mathrm{a}}^{2}\\+3T_{\mathrm{a}}T_{\mathrm{D1}}^{2}L_{\mathrm{aa}}^{2}R_{\mathrm{a}}+4T_{\mathrm{a}}^{2}T_{\mathrm{D1}}L_{\mathrm{aa}}^{2}R_{\mathrm{a}}\\+4T_{\mathrm{a}}^{3}L_{\mathrm{aa}}^{2}R_{\mathrm{a}}-4T_{\mathrm{a}}^{3}T_{\mathrm{D1}}L_{\mathrm{aa}}R_{\mathrm{a}}^{2}\\-T_{\mathrm{D1}}^{2}L_{\mathrm{aa}}^{3}-4T_{\mathrm{a}}^{2}L_{\mathrm{aa}}^{3}\end{pmatrix}2L_{\mathrm{aD}}L_{\mathrm{aa}}I_{\mathrm{D_dc}}\omega^{2}+\\&\begin{pmatrix}-T_{\mathrm{a}}^{3}T_{\mathrm{D1}}R_{\mathrm{a}}^{4}+3T_{\mathrm{a}}^{2}T_{\mathrm{D1}}L_{\mathrm{aa}}R_{\mathrm{a}}^{3}+L_{\mathrm{aa}}^{4}\\-3T_{\mathrm{a}}T_{\mathrm{D1}}L_{\mathrm{aa}}^{2}R_{\mathrm{a}}^{2}+3T_{\mathrm{a}}^{2}L_{\mathrm{aa}}^{2}R_{\mathrm{a}}^{2}\\-3T_{\mathrm{a}}L_{\mathrm{aa}}^{3}R_{\mathrm{a}}-T_{\mathrm{D1}}L_{\mathrm{aa}}^{3}R_{\mathrm{a}}+T_{\mathrm{a}}^{3}L_{\mathrm{aa}}R_{\mathrm{a}}^{3}\end{pmatrix}2L_{\mathrm{aD}}I_{\mathrm{D_dc}}-\\&(L_{\mathrm{aa}}-T_{\mathrm{a}}R_{\mathrm{a}})8L_{\mathrm{aa}}^{3}T_{\mathrm{a}}^{2}T_{\mathrm{D1}}^{2}L_{\mathrm{aD}}I_{\mathrm{D_dc}}\omega^{4}\end{aligned} \tag{A11}$$

$$\begin{aligned}x_4=&-(T_{\mathrm{a}}^{2}R_{\mathrm{a}}^{2}-2T_{\mathrm{a}}L_{\mathrm{aa}}R_{\mathrm{a}}+L_{\mathrm{aa}}^{2})L_{\mathrm{aD}}T_{\mathrm{D1}}^{2}L_{\mathrm{aa}}^{2}I_{\mathrm{D_ac_}\omega\mathrm{s}}\omega^{2}-\\&\begin{pmatrix}T_{\mathrm{a}}^{2}T_{\mathrm{D1}}^{2}R_{\mathrm{a}}^{4}-2L_{\mathrm{aa}}T_{\mathrm{a}}T_{\mathrm{D1}}^{2}R_{\mathrm{a}}^{3}+L_{\mathrm{aa}}^{4}\\+L_{\mathrm{aa}}^{2}T_{\mathrm{D1}}^{2}R_{\mathrm{a}}^{2}+4L_{\mathrm{aa}}^{2}T_{\mathrm{a}}^{2}R_{\mathrm{a}}^{2}-2L_{\mathrm{aa}}^{3}T_{\mathrm{D1}}R_{\mathrm{a}}\\-2L_{\mathrm{aa}}^{3}T_{\mathrm{a}}R_{\mathrm{a}}-2L_{\mathrm{aa}}T_{\mathrm{a}}^{2}T_{\mathrm{D1}}R_{\mathrm{a}}^{3}\end{pmatrix}L_{\mathrm{aD}}I_{\mathrm{D_ac_}\omega\mathrm{s}}-\\&(T_{\mathrm{a}}R_{\mathrm{a}}-L_{\mathrm{aa}})2L_{\mathrm{aD}}T_{\mathrm{a}}T_{\mathrm{D1}}^{2}L_{\mathrm{aa}}^{3}I_{\mathrm{D_ac_}\omega\mathrm{c}}\omega^{3}-\\&\begin{pmatrix}2T_{\mathrm{a}}T_{\mathrm{D1}}^{2}R_{\mathrm{a}}^{3}-2L_{\mathrm{aa}}T_{\mathrm{D1}}^{2}R_{\mathrm{a}}^{2}\\-4L_{\mathrm{aa}}T_{\mathrm{a}}T_{\mathrm{D1}}R_{\mathrm{a}}^{2}-2L_{\mathrm{aa}}^{3}\\+4L_{\mathrm{aa}}^{2}T_{\mathrm{D1}}R_{\mathrm{a}}+2L_{\mathrm{aa}}^{2}T_{\mathrm{a}}R_{\mathrm{a}}\end{pmatrix}L_{\mathrm{aD}}L_{\mathrm{aa}}T_{\mathrm{a}}\omega I_{\mathrm{D_ac_}\omega\mathrm{c}}\end{aligned} \tag{A12}$$

$$\begin{aligned}x_5=&(T_{\mathrm{a}}R_{\mathrm{a}}-L_{\mathrm{aa}})2L_{\mathrm{aD}}T_{\mathrm{a}}T_{\mathrm{D1}}^{2}L_{\mathrm{aa}}^{3}I_{\mathrm{D_ac_}\omega\mathrm{s}}\omega^{3}+\\&\begin{pmatrix}T_{\mathrm{a}}T_{\mathrm{D1}}^{2}R_{\mathrm{a}}^{3}-L_{\mathrm{aa}}T_{\mathrm{D1}}^{2}R_{\mathrm{a}}^{2}-L_{\mathrm{aa}}^{3}\\+2L_{\mathrm{aa}}^{2}T_{\mathrm{D1}}R_{\mathrm{a}}-2L_{\mathrm{aa}}T_{\mathrm{a}}T_{\mathrm{D1}}R_{\mathrm{a}}^{2}\end{pmatrix}2L_{\mathrm{aD}}L_{\mathrm{aa}}T_{\mathrm{a}}I_{\mathrm{D_ac_}\omega\mathrm{s}}\omega+\\&(2T_{\mathrm{a}}L_{\mathrm{aa}}R_{\mathrm{a}}-T_{\mathrm{a}}^{2}R_{\mathrm{a}}^{2}-L_{\mathrm{aa}}^{2})L_{\mathrm{aD}}L_{\mathrm{aa}}^{2}T_{\mathrm{D1}}^{2}I_{\mathrm{D_ac_}\omega\mathrm{c}}\omega^{2}+\\&\begin{pmatrix}2L_{\mathrm{aa}}T_{\mathrm{a}}T_{\mathrm{D1}}^{2}R_{\mathrm{a}}^{3}-T_{\mathrm{a}}^{2}T_{\mathrm{D1}}^{2}R_{\mathrm{a}}^{4}\\+2L_{\mathrm{aa}}T_{\mathrm{a}}^{2}T_{\mathrm{D1}}R_{\mathrm{a}}^{3}-L_{\mathrm{aa}}^{2}T_{\mathrm{D1}}^{2}R_{\mathrm{a}}^{2}\end{pmatrix}L_{\mathrm{aD}}I_{\mathrm{D_ac_}\omega\mathrm{c}}-\\&\begin{pmatrix}4L_{\mathrm{aa}}^{2}T_{\mathrm{a}}T_{\mathrm{D1}}R_{\mathrm{a}}^{2}+L_{\mathrm{aa}}^{2}T_{\mathrm{a}}^{2}R_{\mathrm{a}}^{2}+L_{\mathrm{aa}}^{4}\\-2T_{\mathrm{a}}L_{\mathrm{aa}}^{3}L_{\mathrm{aa}}^{4}R_{\mathrm{a}}-2L_{\mathrm{aa}}^{3}T_{\mathrm{D1}}R_{\mathrm{a}}\end{pmatrix}L_{\mathrm{aD}}I_{\mathrm{D_ac_}\omega\mathrm{c}}\end{aligned} \tag{A13}$$

$$\begin{aligned}y_1=&(8T_{\mathrm{a}}^{3}T_{\mathrm{D1}}^{2}L_{\mathrm{aa}}^{4}R_{\mathrm{a}}-8T_{\mathrm{a}}^{2}T_{\mathrm{D1}}^{2}L_{\mathrm{aa}}^{5})\omega^{4}+\\&(10T_{\mathrm{a}}^{3}T_{\mathrm{D1}}^{2}L_{\mathrm{aa}}^{2}R_{\mathrm{a}}^{3}-14T_{\mathrm{a}}^{2}T_{\mathrm{D1}}^{2}L_{\mathrm{aa}}^{3}R_{\mathrm{a}}^{2}-16T_{\mathrm{a}}^{3}T_{\mathrm{D1}}L_{\mathrm{aa}}^{3}R_{\mathrm{a}}^{2})\omega^{2}+\\&\begin{pmatrix}6T_{\mathrm{a}}T_{\mathrm{D1}}^{2}L_{\mathrm{aa}}^{4}R_{\mathrm{a}}+16T_{\mathrm{a}}^{2}T_{\mathrm{D1}}L_{\mathrm{aa}}^{4}R_{\mathrm{a}}+8T_{\mathrm{a}}^{3}L_{\mathrm{aa}}^{4}R_{\mathrm{a}}\\-2T_{\mathrm{D1}}^{2}L_{\mathrm{aa}}^{5}-8T_{\mathrm{a}}^{2}L_{\mathrm{aa}}^{5}\end{pmatrix}\omega^{2}+\\&2T_{\mathrm{a}}^{3}T_{\mathrm{D1}}^{2}R_{\mathrm{a}}^{5}-6T_{\mathrm{a}}^{2}T_{\mathrm{D1}}^{2}L_{\mathrm{aa}}R_{\mathrm{a}}^{4}-4T_{\mathrm{a}}^{3}T_{\mathrm{D1}}L_{\mathrm{aa}}R_{\mathrm{a}}^{4}+\\&6T_{\mathrm{a}}T_{\mathrm{D1}}^{2}L_{\mathrm{aa}}^{2}R_{\mathrm{a}}^{3}+12T_{\mathrm{a}}^{2}T_{\mathrm{D1}}L_{\mathrm{aa}}^{2}R_{\mathrm{a}}^{3}+2T_{\mathrm{D1}}^{2}L_{\mathrm{aa}}^{3}R_{\mathrm{a}}^{2}-\\&12T_{\mathrm{a}}T_{\mathrm{D1}}L_{\mathrm{aa}}^{3}R_{\mathrm{a}}^{2}-6T_{\mathrm{a}}^{2}L_{\mathrm{aa}}^{3}R_{\mathrm{a}}^{2}+4T_{\mathrm{D1}}L_{\mathrm{aa}}^{4}R_{\mathrm{a}}+6T_{\mathrm{a}}L_{\mathrm{aa}}^{4}R-2L_{\mathrm{aa}}^{5}\end{aligned} \tag{A14}$$

仅考虑励磁绕组与定子绕组间的磁耦合作用，励磁绕组中电流分量的初始幅值如式(A15-A18)所示。

$$I_{\mathrm{f0}}=\frac{T_{\mathrm{a}}^{2}U_{\mathrm{f}}L_{\mathrm{ff}}^{2}\omega^{2}+U_{\mathrm{f}}L_{\mathrm{ff}}^{2}-2R_{\mathrm{f}}T_{\mathrm{a}}UL_{\mathrm{ff}}+R_{\mathrm{f}}^{2}T_{\mathrm{a}}^{2}U_{\mathrm{f}}}{R_{\mathrm{f}}T_{\mathrm{a}}^{2}L_{\mathrm{ff}}^{2}\omega^{2}+R_{\mathrm{f}}L_{\mathrm{ff}}^{2}-2R_{\mathrm{f}}^{2}T_{\mathrm{a}}L_{\mathrm{ff}}+R_{\mathrm{f}}^{3}T_{\mathrm{a}}^{2}} \tag{A15}$$

$$I_{\mathrm{f_dc}}=\mathrm{C}\quad(\mathrm{C\ is\ a\ constant}) \tag{A16}$$

$$I_{\mathrm{f_ac_}\omega\mathrm{s}}=-\frac{\omega L_{\mathrm{af}}R_{\mathrm{f}}T_{\mathrm{a}}^{2}I_{\mathrm{a_dc0}}}{T_{\mathrm{a}}^{2}L_{\mathrm{ff}}^{2}\omega^{2}+L_{\mathrm{ff}}^{2}-2R_{\mathrm{f}}T_{\mathrm{a}}L_{\mathrm{ff}}+R_{\mathrm{f}}^{2}T_{\mathrm{a}}^{2}} \tag{A17}$$

$$I_{\mathrm{f_ac_}\omega\mathrm{c}}=\frac{R_{\mathrm{f}}T_{\mathrm{a}}-L_{\mathrm{ff}}-T_{\mathrm{a}}^{2}L_{\mathrm{ff}}\omega^{2}}{T_{\mathrm{a}}^{2}L_{\mathrm{ff}}^{2}}L_{\mathrm{af}}I_{\mathrm{a_dc0}} \tag{A18}$$

定子绕组中幅值恒定的两个交流分量的幅值如式(A19-A20)所示。

$$I_{\mathrm{a_ac_}\omega\mathrm{s_con}}=\omega R_{\mathrm{a}}L_{\mathrm{af}}I_{\mathrm{f0}}/(\omega^{2}L_{\mathrm{aa}}^{2}+R_{\mathrm{a}}^{2}) \tag{A19}$$

$$I_{\mathrm{a_ac_}\omega\mathrm{c_con}}=\omega^{2}L_{\mathrm{aa}}L_{\mathrm{af}}I_{\mathrm{f0}}/(\omega^{2}L_{\mathrm{aa}}^{2}+R_{\mathrm{a}}^{2}) \tag{A20}$$

定子绕组中衰减的电流分量初始幅值如式(A21-A25)所示，其中 x_6、x_7、x_8、x_9、x_{10}、y_2 分别

为式(A26-A31)。

$$I_{a_dc}=C+x_6/y_2 \quad \text{(C is a constant)} \tag{A21}$$

$$I_{a_ac_\omega s}=x_7/y_2 \tag{A22}$$

$$I_{a_ac_\omega c}=x_8/y_2 \tag{A23}$$

$$I_{a_ac_2\omega s}=x_9/y_2 \tag{A24}$$

$$I_{a_ac_2\omega c}=x_{10}/y_2 \tag{A25}$$

$$\begin{aligned}x_6=&8L_{aa}^4L_{af}^4T_a^3T_{fl}^2I_{ac_os}^2\omega^5-4L_{af}L_{aa}^4T_a^2T_{fl}^2i_{f_ac_\omega c}\omega^4-\\&\begin{pmatrix}5T_{fl}^2T_a^2R_a^4-2T_a^2T_{fl}^2L_{aa}^2R_a^2\\+T_{fl}^2L_{aa}^2+4T_a^2L_{af}^2\\-8T_a^2T_{fl}L_{aa}R_a\end{pmatrix}\begin{pmatrix}i_{f_ac_\omega c}\\-2\omega T_a\,I_{f_ac_\omega s}\end{pmatrix}L_{af}L_{aa}^2\omega^2-\\&\begin{pmatrix}T_{fl}^2T_a^2R_a^4-2L_{aa}R_a^3T_a\,T_{fl}^2+L_{aa}^4\\-2L_{aa}R_a^3T_a^2T_{fl}+L_{aa}^2R_a^2T_{fl}^2\\+4T_a\,T_{fl}L_{aa}^2R_a^2+L_{aa}^2R_a^2T_a^2\\-2T_{fl}L_{aa}^3R_a-2T_a\,L_{aa}^3R_a\end{pmatrix}(i_{f_ac_\omega c}-2\omega T_a\,I_{f_ac_\omega s})L_{af}\end{aligned} \tag{A26}$$

$$x_7=\begin{bmatrix}(L_{aa}-T_aR_a)4T_a^2L_{aa}^2\omega^3-T_a^3R_a^3\\+3T_a^2L_{aa}R_a^2-3T_aL_{aa}^2R_a+L_{aa}^3\end{bmatrix}2L_{af}T_{fl}^2I_{f_dc}R_a \tag{A27}$$

$$\begin{aligned}x_8=&\begin{pmatrix}T_a^3T_{fl}^2R_a^3-3T_a^2T_{fl}^2L_{aa}R_a^2-T_{fl}^2L_{aa}^3\\-4T_a^3T_{fl}L_{aa}R_a^2+3T_aT_{fl}^2L_{aa}^2R_a\\+4T_a^3L_{aa}^2R_a+4T_a^2T_{fl}L_{aa}^2R_a-4T_a^2L_{aa}^3\end{pmatrix}2L_{af}L_{aa}I_{f_dc}\omega^2-\\&\begin{pmatrix}T_a^3T_{fl}R_a^4+3T_a^2L_{aa}^2R_a^2-T_a^3L_{aa}R_a^3\\+T_{fl}L_{aa}^3R_a+3T_aT_{fl}L_{aa}^2R_a^2-3T_a^2T_{fl}L_{aa}R_a^3\\-L_{aa}^4+3T_a\,L_{aa}^3R_a\end{pmatrix}2L_{af}I_{f_dc}-\\&(L_{aa}-T_aR_a)8L_{aa}^3T_a^2T_{fl}^2L_{af}I_{f_dc}\omega^4\end{aligned} \tag{A28}$$

$$\begin{aligned}x_9=&(-T_a^2R_a^2+2T_aL_{aa}R_a-L_{aa}^2)L_{af}T_{fl}^2L_{aa}^2I_{f_ac_\omega s}\omega^2-\\&\begin{pmatrix}T_a^2T_{fl}^2R_a^4-2L_{aa}T_aT_{fl}^2R_a^3+L_{aa}^4\\+L_{aa}^2T_{fl}^2R_a^2+4L_{aa}^2T_a^2R_a^2-2L_{aa}^3T_{fl}R_a\\-2L_{aa}^3T_aR_a-2L_{aa}T_a^2T_{fl}R_a^3\end{pmatrix}L_{af}I_{f_ac_\omega s}-\\&(T_aR_a-L_{aa})2L_{af}T_aT_{fl}^2L_{aa}^3I_{f_ac_\omega c}\omega^3-\\&\begin{pmatrix}2T_aT_{fl}^2R_a^3-2L_{aa}T_{fl}^2R_a^2\\-4L_{aa}T_aT_{fl}R_a^2+4L_{aa}^2T_{fl}R_a\\+2L_{aa}^2T_aR_a-2L_{aa}^3\end{pmatrix}L_{af}L_{aa}T_aI_{f_ac_\omega c}\omega\end{aligned} \tag{A29}$$

$$\begin{aligned}x_{10}=&(T_aR_a-L_{aa})2L_{af}T_aT_{fl}^2L_{aa}^3I_{f_ac_\omega s}\omega^3+\\&\begin{pmatrix}T_aT_{f1}^2R_a^3-L_{aa}T_{fl}^2R_a^2-L_{aa}^3\\+2L_{aa}^2T_{fl}R_a-2L_{aa}T_aT_{fl}R_a^2\end{pmatrix}2L_{af}L_{aa}T_aI_{f_ac_\omega s}\omega-\\&(T_a^2R_a^2-2T_aL_{aa}R_a+L_{aa}^2)L_{af}L_{aa}^2T_{fl}^2I_{f_ac_\omega c}\omega^2-\\&\begin{pmatrix}T_a^2T_{fl}^2R_a^4-2L_{aa}T_aT_{fl}^2R_a^3-2L_{aa}T_a^2T_{fl}R_a^3\\+L_{aa}^2T_{fl}^2R_a^2+4L_{aa}^2T_aT_{fl}R_a^2+L_{aa}^2T_a^2R_a^2\\-2L_{aa}^3T_{fl}R_a-2T_aL_{aa}^3L_{aa}^4R_a+L_{aa}^4\end{pmatrix}L_{af}I_{f_ac_\omega c}\end{aligned} \tag{A30}$$

$$\begin{aligned}y_2=&(T_aR_a-L_{aa})8T_a^2T_{fl}^2L_{aa}^4\omega^4+\\&\begin{pmatrix}10T_a^3T_{fl}^2L_{aa}^2R_a^3-14T_a^2T_{fl}^2L_{aa}^3R_a^2-8T_a^2L_{aa}^5\\-2T_{fl}^2L_{aa}^5+6T_aT_{fl}^2L_{aa}^4R_a+16T_a^2T_{fl}L_{aa}^4R_a\\+8T_a^3L_{aa}^4R_a-16T_a^3T_{fl}L_{aa}^3R_a^2\end{pmatrix}\omega^2+\\&2T_a^3T_{fl}^2R_a^5-6T_a^2T_{fl}^2L_{aa}R_a^4-4T_a^3T_{fl}L_{aa}^5R_a^4+6T_aL_{aa}^4R_a+\\&6T_aT_{fl}^2L_{aa}^2R_a^3+12T_a^2T_{fl}L_{aa}^2R_a^3-2L_{aa}^5+2T_{fl}^2L_{aa}^3R_a^2-\\&12T_aT_{fl}L_{aa}^3R_a^2-6T_a^2L_{aa}^3R_a^2+4T_{fl}L_{aa}^4R_a\end{aligned} \tag{A31}$$

附录 B

表 B1　同步发电机参数

Table B1　Synchronous generator parameters

参数	值
额定功率 P_n/MW	1200
额定电压 U_n/kV	24
功率因数 cosΦ_n	0.9
额定励磁电流 I_{fn}/A	6196
额定励磁电压 U_{fn}/V	514.4
直轴同步电抗 x_d/pu	2.00
直轴暂态同步电抗 x'_d/pu	0.37
直轴次暂态同步电抗 x''_d/pu	0.23
交轴同步电抗 x_q/pu	1.99
交轴次暂态同步电抗 x''_q/pu	0.23
暂态时间常数 T'_d/s	1.464
次暂态时间常数 T''_d/s	0.035
非周期分量时间常数 T_a/s	0.291

表 B2　常见导电材料参数

Table B2　Parameters of Different Materials

材料	σ/siemens·m–1	T''_d/s
黄铜(Brass)	1.5E7	0.009
紫铜(Copper)	5.8E7	0.035
6061 铝合金(AA6061)	3.8E7	0.023
7075 铝合金(AA7075)	2.2E7	0.013
不锈钢(Stainless steel)	1.1E6	0.001

表 B3　不同因素对故障电流的影响

Table B3　Influence of factors on fault current

因素	首峰值	延时过零
阻尼绕组电导率 σ	σ 越大，首峰值越高	σ 极大或极小时，无延时过零
故障相位角 θ_0	当 θ_0 恰使互感 $M_{aD}(M_{bD}/M_{cD})$ 达到最大值，A (B/C)相故障电流首峰值最高	当 θ_0 恰使互感 $M_{aD}(M_{bD}/M_{cD})$ 达到最大值，A (B/C)相故障电流出现最严重延时过零
励磁状态	过励磁状态下，故障电流首峰值参照铁心磁化曲线增大	欠励磁状态下，延时过零现象加剧
转速	低频阶段首峰值不会明显小于工频阶段	低频阶段交流周期长，延时过零加剧

表 B4　HECPS-3S 型 GCB 开断能力

Table B4　Breaking Capacity of HECPS-3S GCB

频率	开断能力
45~65Hz	100kA
20~45Hz	65kA
≤20Hz	不具备开断能力

附录 C

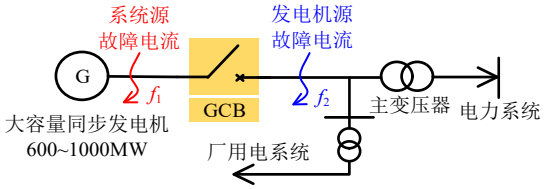
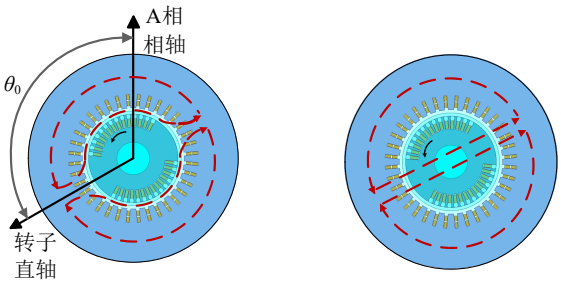


图 C1　大容量同步发电机、GCB 和升压变压器系统

Fig. C1　Single-line diagram of high-capacity synchronous generator, GCB and Step-up Transformer system



(a) 次暂态　　(b) 稳态

图 C2　发电机磁链示意图

Fig. C2　Magnetic linkage inside generator

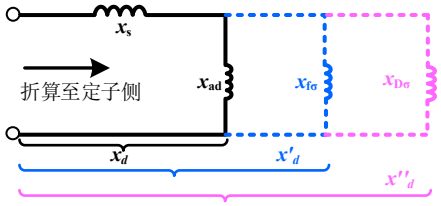
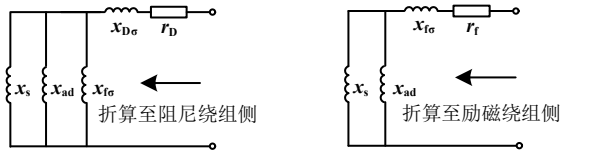


图 C3　不同阶段主磁通等效电抗

Fig. C3　Equivalent reactance of main magnetic flux path in different stages



(a) 折算至阻尼绕组侧的 T'_d 等效电路　　(b) 折算至励磁绕组侧的 T''_d 等效电路

图 C4　时间常数的等效电路

Fig. C4　Equivalent circuits to obtain time constants

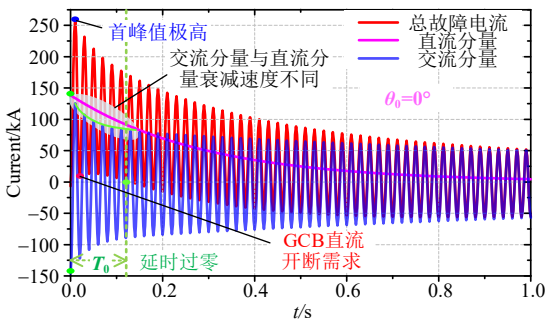


图 C5　θ_0=0 时 a 相故障电流及其分量

Fig. C5　Total fault current of phase-a and its components when θ_0=0

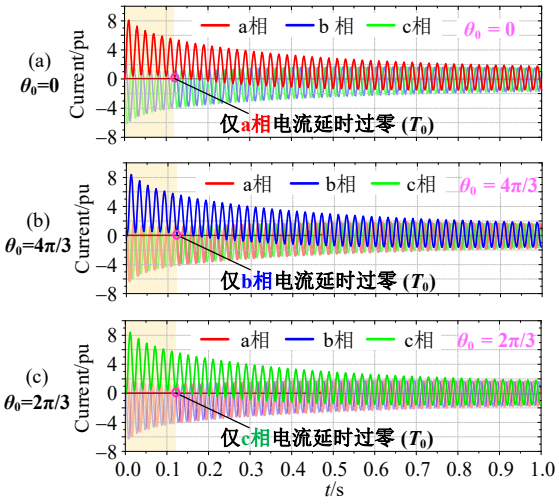


图 C6　不同故障相位角 θ_0 下的三相故障电流

Fig. C6　Fault currents with different θ_0

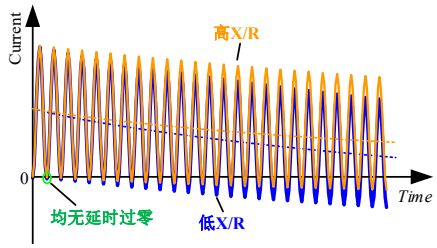


图 C7　忽略绕组间耦合作用时故障电流波形示意图

Fig. C7　Fault current when ignoring coupling effects

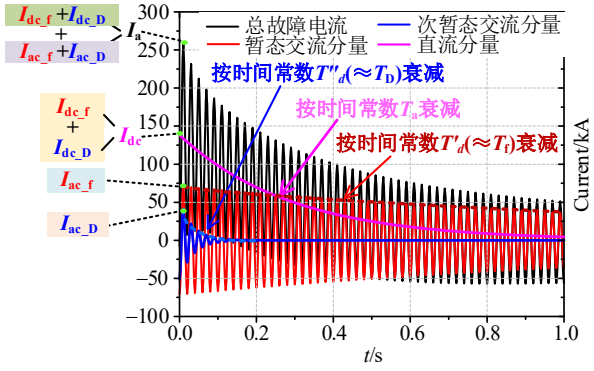


图 C8　故障电流各分量幅值及衰减速度

Fig. C8　Fault current components and their amplitudes and decay speeds

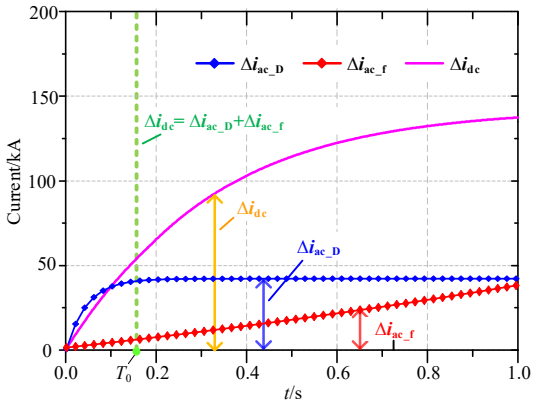


图 C9　Δi_{dc}、Δi_{ac_f}和Δi_{ac_D}的变化波形

Fig. C9　Typical waveforms of Δi_{dc}, Δi_{ac_f} and Δi_{ac_D}.

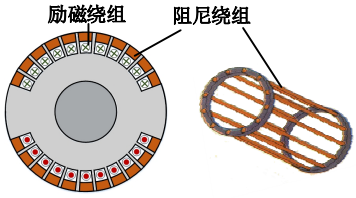


图 C10　实际大容量同步发电机的阻尼绕组结构

Fig. C10　Diagram of damping-winding in practical HSG

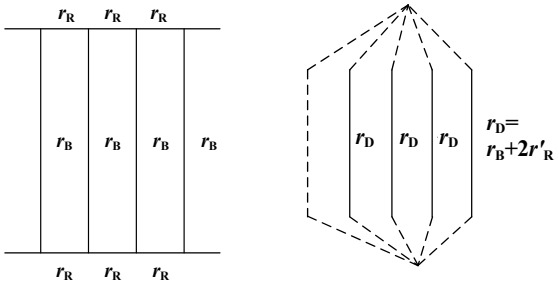


图 C11　笼型结构的星三角等效变换

Fig. C11　Equivalent transformation of the cage structure

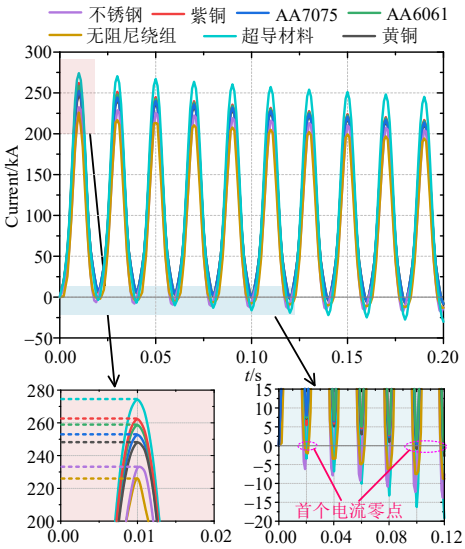


图 C12　不同阻尼绕组材料对应的故障电流仿真结果

Fig. C12　Simulated fault currents with different damping-winding materials

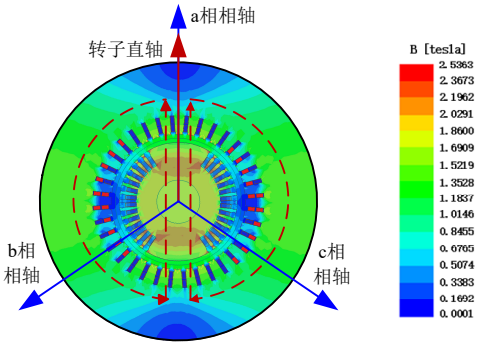


图 C13　转子直轴与 a 相相轴重合时的磁链分布情况

Fig. C13　Magnetic flux distribution when d-axis coincides with phase-a axis

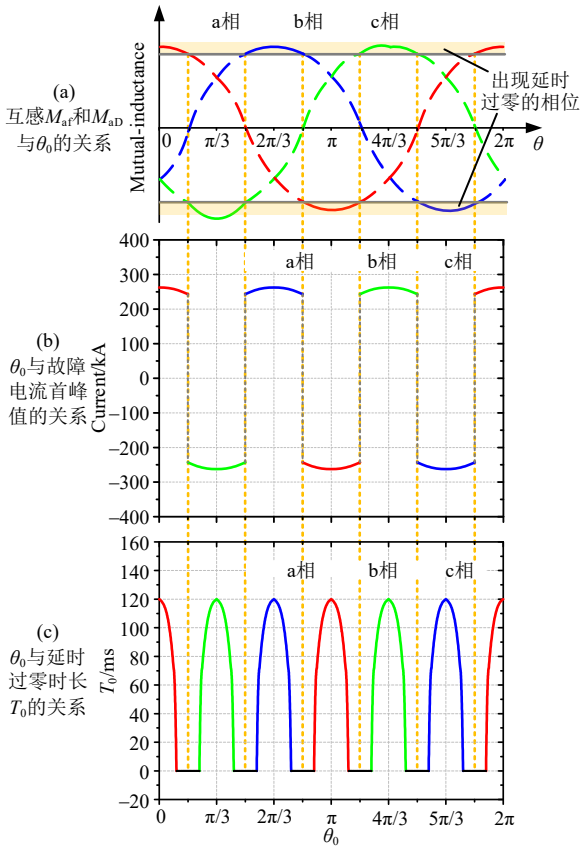


图 C14　有限元仿真计算结果

Fig. C14　Simulation results obtained by FEM

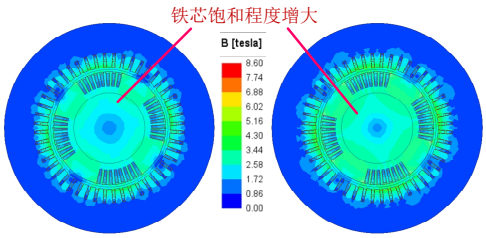


图 C15　不同励磁状态下发电机内部磁场分布情况

Fig. C15　Internal magnetic field of generator under different excitation states

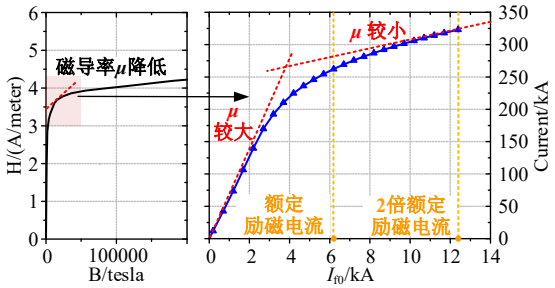
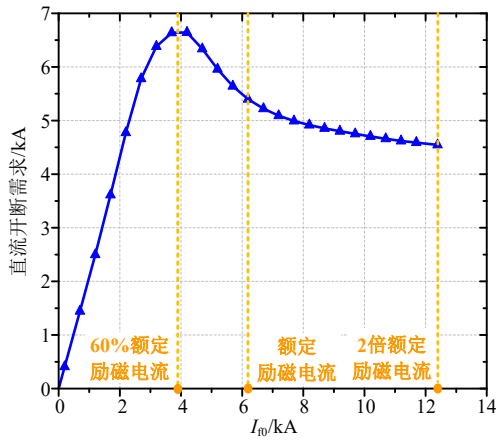
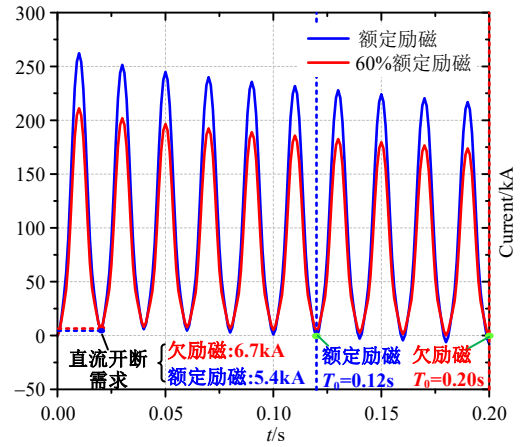


图 C16　不同励磁状态铁心饱和对故障电流首峰值的影响

Fig. C16　The influence of core saturation on the first-peak value of fault current as field current changes



(a) 直流开断需求



(b) 励磁电流为0.6pu,1pu时的故障电流

图 C17　励磁状态对延时过零及直流开断需求的影响

Fig. C17　Influence of excitation state on delayed current zero and DC interruption demand

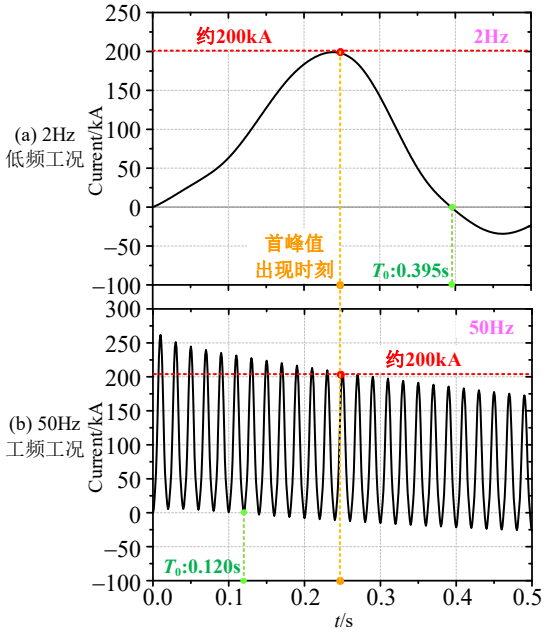


图 C18　不同工况下的故障电流

Fig. C18　Fault currents under different working conditions

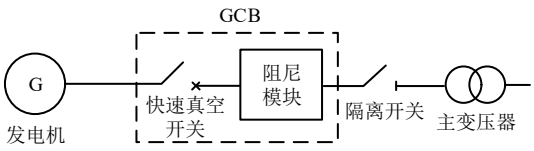


图 C19　环保型大容量快速 GCB 示意图

Fig. C19　GCB equipped with damping module

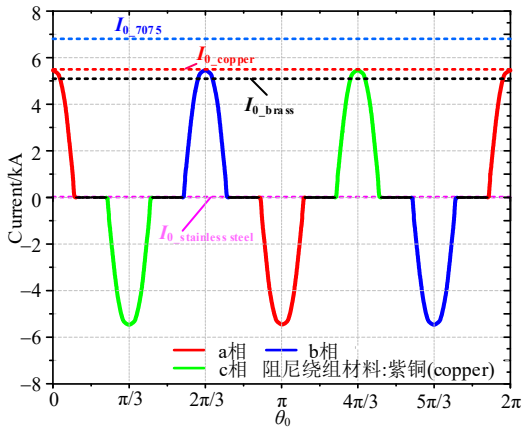


图 C20　GCB 的直流开断需求

Fig. C20　DC interruption requirement for GCB

附录 D

发电机各绕组的磁链方程：

$$\begin{bmatrix}\psi_a\\ \psi_b\\ \psi_c\\ \psi_f\\ \psi_D\\ \psi_Q\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}L_{aa} & M_{ab} & M_{ac} & M_{af} & M_{aD} & M_{aQ}\\ M_{ba} & L_{bb} & M_{bc} & M_{bf} & M_{bD} & M_{bQ}\\ M_{ca} & M_{cb} & L_{cc} & M_{cf} & M_{cD} & M_{cQ}\\ M_{fa} & M_{fb} & M_{fc} & L_{ff} & M_{fD} & M_{fQ}\\ M_{Da} & M_{Db} & M_{Dc} & M_{Df} & L_{DD} & M_{DQ}\\ M_{Qa} & M_{Qb} & M_{Qc} & M_{Qf} & M_{QD} & L_{QQ}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}-i_a\\ -i_b\\ -i_c\\ i_f\\ i_D\\ i_Q\end{bmatrix} \tag{D1}$$

故障电流表达式：

$$\begin{aligned}i_a=&\frac{E}{x_d}\cos\omega t+E\left(\frac{1}{x''_d}-\frac{1}{x'_d}\right)e^{-\frac{t}{T''_d}}\cos(\omega t+\theta_0)+\\&E\left(\frac{1}{x'_d}-\frac{1}{x_d}\right)e^{-\frac{t}{T_d}}\cos(\omega t+\theta_0)-\\&\frac{E(x''_d+x''_q)}{2x''_dx''_q}e^{-\frac{t}{T_a}}\cos\theta_0+\\&\frac{E(x''_d-x''_q)}{2x''_dx''_q}e^{-\frac{t}{T_a}}\cos(2\omega t+\theta_0)\end{aligned} \tag{D2}$$

发电机直轴等效电抗表达式：

$$x''_d=x_s+x''_{ad}=x_s+\frac{1}{\frac{1}{x_{ad}}+\frac{1}{x_{f\sigma}}+\frac{1}{x_{D\sigma}}} \tag{D3}$$

$$x'_d=x_s+x'_{ad}=x_s+\frac{1}{\frac{1}{x_{ad}}+\frac{1}{x_{f\sigma}}} \tag{D4}$$

$$x_d=x_s+x_{ad} \tag{D5}$$

时间常数表达式：

$$T_{\mathrm{a}}=\frac{L_{\mathrm{aa}}}{R_{\mathrm{a}}}=\frac{2x_d''x_q''}{\omega r(x_d''+x_q'')} \tag{D6}$$

$$T_d''=\frac{L_{\mathrm{DD}}''}{r_{\mathrm{D}}}=\frac{x_{\mathrm{D}\sigma}+\dfrac{x_{\mathrm{ad}}x_{\mathrm{s}}x_{\mathrm{f}\sigma}}{x_{\mathrm{ad}}x_{\mathrm{f}\sigma}+x_{\mathrm{s}}x_{\mathrm{f}\sigma}+x_{\mathrm{ad}}x_{\mathrm{s}}}}{\omega r_{\mathrm{D}}} \tag{D7}$$

$$T_d'=\frac{L_{\mathrm{ff}}'}{r_{\mathrm{f}}}=(x_{\mathrm{f}\sigma}+\frac{x_{\mathrm{ad}}x_{\mathrm{s}}}{x_{\mathrm{ad}}+x_{\mathrm{s}}})/\omega r_{\mathrm{f}} \tag{D8}$$

发电机各绕组状态方程：

$$\begin{cases}0=-R_{\mathrm{a}}i_{\mathrm{a}}-L_{\mathrm{aa}}\dfrac{\mathrm{d}i_{\mathrm{a}}}{\mathrm{d}t}+M_{\mathrm{af}}\dfrac{\mathrm{d}i_{\mathrm{f}}}{\mathrm{d}t}+i_{\mathrm{f}}\dfrac{\mathrm{d}M_{\mathrm{af}}}{\mathrm{d}t}+\\ \quad M_{\mathrm{aD}}\dfrac{\mathrm{d}i_{\mathrm{D}}}{\mathrm{d}t}+i_{\mathrm{D}}\dfrac{\mathrm{d}M_{\mathrm{aD}}}{\mathrm{d}t}\\ u_{\mathrm{f}}=R_{\mathrm{f}}i_{\mathrm{f}}+L_{\mathrm{ff}}\dfrac{\mathrm{d}i_{\mathrm{f}}}{\mathrm{d}t}-M_{\mathrm{af}}\dfrac{\mathrm{d}i_{\mathrm{a}}}{\mathrm{d}t}-i_{\mathrm{a}}\dfrac{\mathrm{d}M_{\mathrm{af}}}{\mathrm{d}t}+M_{\mathrm{fD}}\dfrac{\mathrm{d}i_{\mathrm{D}}}{\mathrm{d}t}\\ 0=R_{\mathrm{D}}i_{\mathrm{D}}+L_{\mathrm{DD}}\dfrac{\mathrm{d}i_{\mathrm{D}}}{\mathrm{d}t}-M_{\mathrm{aD}}\dfrac{\mathrm{d}i_{\mathrm{a}}}{\mathrm{d}t}-i_{\mathrm{a}}\dfrac{\mathrm{d}M_{\mathrm{aD}}}{\mathrm{d}t}+M_{\mathrm{fD}}\dfrac{\mathrm{d}i_{\mathrm{f}}}{\mathrm{d}t}\end{cases} \tag{D9}$$

$$\begin{cases}M_{\mathrm{af}}=L_{\mathrm{af}}\cos\theta\\ M_{\mathrm{aD}}=L_{\mathrm{aD}}\cos\theta\end{cases} \tag{D10}$$

$$\frac{\mathrm{d}M_{\mathrm{af}}}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}(L_{\mathrm{af}}\cos\theta)}{\mathrm{d}t}=-\omega L_{af}\sin(\omega t) \tag{D11}$$

$$\frac{\mathrm{d}M_{\mathrm{aD}}}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}(L_{\mathrm{aD}}\cos\theta)}{\mathrm{d}\theta}=-\omega L_{\mathrm{aD}}\sin(\omega t) \tag{D12}$$

不考虑耦合作用的电流表达式：

$$\begin{cases}i_{\mathrm{a0}}=i_{\mathrm{a_ac_}\omega\mathrm{_con}}+i_{\mathrm{a_dc0}}=I_{\mathrm{a_ac_}\omega\mathrm{_con}}\cos(\omega t)+I_{\mathrm{a_dc0}}\cdot e^{-t/T_{\mathrm{a}}}\\ T_{\mathrm{a}}=L_{\mathrm{aa}}/R_{\mathrm{a}}=X_{\mathrm{aa}}/(\omega R_{\mathrm{a}})\end{cases} \tag{D13}$$

考虑阻尼绕组与定子绕组间的耦合作用后的绕组状态方程：

$$0=R_{\mathrm{D}}i_{\mathrm{D}}+L_{\mathrm{DD}}\frac{\mathrm{d}i_{\mathrm{D}}}{\mathrm{d}t}-M_{\mathrm{aD}}\frac{\mathrm{d}i_{\mathrm{a}}}{\mathrm{d}t}-i_{\mathrm{a}}\frac{\mathrm{d}M_{\mathrm{aD}}}{\mathrm{d}t} \tag{D14}$$

$$0=-R_{\mathrm{a}}i_{\mathrm{a}}-L_{\mathrm{aa}}\frac{\mathrm{d}i_{\mathrm{a}}}{\mathrm{d}t}+M_{\mathrm{aD}}\frac{\mathrm{d}i_{\mathrm{D}}}{\mathrm{d}t}+i_{\mathrm{D}}\frac{\mathrm{d}M_{\mathrm{aD}}}{\mathrm{d}t} \tag{D15}$$

电流表达式

$$\begin{cases}i_{\mathrm{D}}=I_{\mathrm{D_dc}}\cdot e^{-t/T_{\mathrm{D}}}+[I_{\mathrm{D_ac_}\omega\mathrm{s}}\sin(\omega t)+\\ \qquad I_{\mathrm{D_ac_}\omega\mathrm{c}}\cos(\omega t)]\cdot e^{-t/T_{\mathrm{a}}}\\ T_{\mathrm{D}}=L_{\mathrm{DD}}/R_{\mathrm{D}}\qquad T_{\mathrm{a}}=L_{\mathrm{aa}}/R_{\mathrm{a}}\end{cases} \tag{D16}$$

$$\begin{aligned}i_{\mathrm{a}}=&I_{\mathrm{a_dc}}\cdot e^{-t/T_{\mathrm{a}}}+\\ &[I_{\mathrm{a_ac_}\omega\mathrm{s}}\sin(\omega t)+I_{\mathrm{a_ac_}\omega\mathrm{c}}\cos(\omega t)]\cdot e^{-t/T_{\mathrm{D}}}+\\ &[I_{\mathrm{a_ac_2}\omega\mathrm{s}}\sin(2\omega t)+I_{\mathrm{a_ac_2}\omega\mathrm{c}}\cos(2\omega t)]\cdot e^{-t/T_{\mathrm{a}}}\end{aligned} \tag{D17}$$

$$\begin{cases}I_{\mathrm{a_dc}}=I_{\mathrm{a_ac_2}\omega\mathrm{s}}+I_{\mathrm{a_ac_2}\omega\mathrm{c}}+I_{\mathrm{a_ac_}\omega\mathrm{s}}+I_{\mathrm{a_ac_}\omega\mathrm{c}}\\ I_{\mathrm{D_dc}}=I_{\mathrm{D_ac_}\omega\mathrm{s}}+I_{\mathrm{D_ac_}\omega\mathrm{c}}\end{cases} \tag{D18}$$

考虑励磁绕组与定子绕组间的耦合作用后的绕组状态方程：

$$u_{\mathrm{f}}=R_{\mathrm{f}}i_{\mathrm{f}}+L_{\mathrm{ff}}\frac{\mathrm{d}i_{\mathrm{f}}}{\mathrm{d}t}-M_{\mathrm{af}}\frac{\mathrm{d}i_{\mathrm{a}}}{\mathrm{d}t}-i_{\mathrm{a}}\frac{\mathrm{d}M_{\mathrm{af}}}{\mathrm{d}t} \tag{D19}$$

$$0=-R_{\mathrm{a}}i_{\mathrm{a}}-L_{\mathrm{aa}}\frac{\mathrm{d}i_{\mathrm{a}}}{\mathrm{d}t}+M_{\mathrm{af}}\frac{\mathrm{d}i_{\mathrm{f}}}{\mathrm{d}t}+i_{\mathrm{f}}\frac{\mathrm{d}M_{\mathrm{af}}}{\mathrm{d}t} \tag{D20}$$

电流表达式

$$\begin{cases}i_{\mathrm{f}}=I_{\mathrm{f0}}+I_{\mathrm{f_dc}}\cdot e^{-t/T_{\mathrm{f}}}+\\ \quad[I_{\mathrm{f_ac_}\omega\mathrm{s}}\sin(\omega t)+I_{\mathrm{f_ac_}\omega\mathrm{c}}\cos(\omega t)]\cdot e^{-t/T_{\mathrm{a}}}\\ T_{\mathrm{f}}=L_{\mathrm{ff}}/R_{\mathrm{f}}\quad T_{\mathrm{a}}=L_{\mathrm{aa}}/R_{\mathrm{a}}\end{cases} \tag{D21}$$

$$\begin{aligned}i_{\mathrm{a}}=&[I_{\mathrm{a_ac_}\omega\mathrm{s_con}}\sin(\omega t)+I_{\mathrm{a_ac_}\omega\mathrm{c_con}}\cos(\omega t)]+\\ &I_{\mathrm{a_dc}}\cdot e^{-t/T_{\mathrm{a}}}+\\ &[I_{\mathrm{a_ac_2}\omega\mathrm{s}}\sin(2\omega t)+I_{\mathrm{a_ac_2}\omega\mathrm{c}}\cos(2\omega t)]\cdot e^{-t/T_{\mathrm{a}}}+\\ &[I_{\mathrm{a_ac_}\omega\mathrm{s}}\sin(\omega t)+I_{\mathrm{a_ac_}\omega\mathrm{c}}\cos(\omega t)]\cdot e^{-t/T_{\mathrm{f}}}\end{aligned} \tag{D22}$$