

# 适用于后备保护整定计算的阶段式发电机模型

雷 淇<sup>1,2</sup>, 王晓阳<sup>3</sup>, 刘亚东<sup>3</sup>, 于芮枝<sup>4</sup>, 石东源<sup>1,2</sup>, 李银红<sup>1,2</sup>

(1. 华中科技大学 电气与电子工程学院 强电磁工程与新技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074;

2. 华中科技大学 电气与电子工程学院 电力安全与高效湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430074;

3. 中国电力科学研究院 电网安全与节能国家重点实验室, 北京 100192; 4. 国网徐州供电公司, 江苏 徐州 221000)

**摘要:**目前, 保护整定计算中, 发电机常采用次暂态模型来简化计算, 但该模型未考虑短路电流随时间的衰减, 而后备保护具有延时特性, 采用发电机次暂态模型进行后备保护整定计算将降低保护定值的精度。为提高后备保护整定计算的精度, 提出了阶段式发电机模型, 基于在后备保护典型时间节点处获取线路故障时发电机输出的电气量特性, 得到该时间段等效的发电机静态模型, 继而构成适用于后备保护整定计算的阶段式发电机模型。最后, 在 IEEE 39 节点系统中仿真验证了该模型可以进一步提高后备保护整定计算的定值精度。

**关键词:**继电保护; 后备保护; 保护整定计算; 阶段式发电机模型; 短路电流; 助增系数

**中图分类号:** TM 77

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16081/j.issn.1006-6047.2019.01.027

## 0 引言

继电保护整定计算是确定保护装置动作定值、保证电网安全运行的重要基础性工作<sup>[1-2]</sup>。目前保护定值普遍采用“离线整定, 在线不变”的预整定模式<sup>[3]</sup>, 为了保证保护装置在系统运行方式变化时仍能正确动作, 整定计算必须进行大量重复的故障计算来确定保护定值以确保在最严苛的运行方式下各级保护能够协调配合动作, 这对整定计算所采用的电力系统模型提出了较高的要求<sup>[4]</sup>。一方面, 所采用的模型应尽量简单, 以降低故障计算的计算量, 提高整定计算的效率; 另一方面, 所采用的模型应能准确地反映故障时的电网电气量特性, 从而保证整定计算的准确性<sup>[5]</sup>。

在故障计算中, 发电机作为唯一的动态元件, 其模型的选取对故障计算的复杂性和准确性起着至关重要的作用。文献[6]通过理论分析得到了各阶发电机模型间的参数转换关系, 并对该关系的正确性进行了仿真验证。文献[7]分析了发电机模型对短路电流衰减的影响, 结果表明距离短路点较近、容量较大的发电机对短路电流衰减的影响不可忽视。实际电网故障计算中, 通常不计及发电机动态过程, 通过获取故障瞬时的电网电气量的特性, 将发电机等效为一个静止元件以减少计算量<sup>[5]</sup>。

后备保护是继电保护的重要组成部分, 一般是指当主保护拒动时用于切除设备故障的保护<sup>[8]</sup>。在重大电网事故中, 后备保护的重要性进一步凸显, 如 2016 年西安 330 kV 南郊变全站失压事件, 正是由于

后备保护装置的有效动作避免了事态的进一步恶化<sup>[9]</sup>。2017 年《国家电网公司继电保护技术发展纲要》将“研究后备保护优化技术, 提升后备保护适应复杂大电网的能力”作为重点研究方向, 对后备保护整定计算工作提出了新的要求。后备保护的准确动作依赖于准确的后备保护定值, 此外, 为了实现各级后备保护间的协调配合, 后备保护定值通常有一定的延时, 如三段式电流保护和距离保护的 II 段和 III 段均有秒级左右的延时<sup>[10]</sup>。然而, 目前后备保护整定计算为了减少计算量, 采用了简化的发电机次暂态模型, 即不考虑故障后电网电气量的动态变化, 这将降低后备保护定值的精度。

针对现有后备保护整定计算中发电机模型存在的缺陷, 本文提出了阶段式发电机模型。该模型以后备保护典型时间节点为分段基准, 分析发生故障时典型时间节点处发电机输出的电气量特性, 在时间节点间维持电气量不变, 得到该时间段等效的发电机静态模型, 继而得到适用于后备保护整定计算的阶段式发电机模型。最后在 DSP-BPA 平台上仿真验证了阶段式发电机模型的正确性, 并与现有模型进行了比较分析。仿真结果表明, 阶段式发电机模型可以提高后备保护整定计算的定值精度, 且从短路故障发生后的某一时刻而言, 该模型仍采用恒定电势和恒定阻抗的组合, 未增加现有模型的复杂度, 具有较好的实用性。

## 1 发电机典型模型

### 1.1 发电机模型概述

根据  $d$ 、 $q$  轴绕组上的磁链状态量以及转子机械状态量, 可以将发电机划分为 7 阶、5 阶、3 阶、2 阶模型。七阶发电机模型的状态量为定子绕组磁链  $\psi_d$ 、 $\psi_q$ , 励磁绕组磁链  $\psi_f$ , 横轴阻尼绕组磁链  $\psi_D$ 、纵

收稿日期: 2017-09-14; 修回日期: 2018-09-29

基金项目: 国家电网公司总部科技项目 (JB71-16-010)

Project supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (JB71-16-010)

轴阻尼绕组磁链  $\psi_Q$ , 以及转子机械角速度  $\omega$  和转子机械角位移  $\delta$ , 该模型计及了 5 个绕组的电磁暂态过程以及转子动态过程, 其数学模型如式 (1) 所示<sup>[11]</sup>, 其中, 各参数定义详见文献 [11], 本文不再赘述。

$$\left\{ \begin{array}{l} u_d = -\omega \psi_q - r_a i_d + p \psi_d \\ u_q = \omega \psi_d - r_a i_q + p \psi_q \\ T'_{d0} p E'_q = E'_f - \frac{X_d - X_1}{X'_d - X_1} E'_q + \frac{X_d - X'_d}{X'_d - X_1} E''_q - \\ \quad \frac{(X_d - X'_d)(X''_d - X_1)}{X'_d - X_1} i_d \\ T''_{d0} p E''_q = \frac{X''_d - X_1}{X'_d - X_1} T'_{d0} p E'_q - E''_q + E'_q - (X'_d - X''_d) i_d \\ T''_{q0} p E''_d = -E''_d + (X_q - X''_q) i_q \\ T_J (d\omega/dt) = T_m - D(\omega - 1) - \\ \quad [E''_q i_q + E''_d i_d - (X''_d - X''_q) i_d i_q] \\ d\delta/dt = \omega - 1 \end{array} \right. \quad (1)$$

七阶发电机模型能够详细描述发电机的动态过程, 但是对于容量庞大的多机电力系统, 这将会大幅增加计算量。因此, 在实际应用中, 仅仅对一些需要特殊关心的发电机采用高阶的数学模型<sup>[12]</sup>。

根据对电力系统分析计算的不同精度要求, 可以对发电机模型进行简化。若忽略定子绕组电磁暂态过程, 令变压器电势不变, 定子电压方程中的  $\omega = 1$  p.u., 同时为方便分析, 将转子侧磁链变量  $\psi_f$ 、 $\psi_D$ 、 $\psi_Q$  折合到定子侧用实用物理量表示, 可以得到状态量为  $E'_q$ 、 $E''_q$ 、 $E''_d$ 、 $\omega$  和  $\delta$  的五阶模型。若进一步忽略横、纵轴阻尼绕组的暂态过程, 可以得到状态量为  $E'_q$ 、 $\omega$  和  $\delta$  的三阶模型。常用的二阶模型有经典模型和次暂态模型, 其状态量为  $\omega$  和  $\delta$ 。经典模型中电势采用恒定暂态电势  $E'$ , 次暂态模型中电势采用恒定次暂态电势  $E''$ , 阻抗采用  $X''_d$ 。

## 1.2 发电机模型的应用领域

不同阶次模型对发电机描述的精确程度不同, 其应用领域也有所区别<sup>[13]</sup>。七阶发电机模型的精确度最高, 适用于描述实心转子的汽轮发电机, 目前多应用于分析由发电机组轴系引起的次同步谐振现象、计算大扰动后轴系的暂态扭矩等需同时考虑电磁暂态过程和机电暂态过程的问题中<sup>[14]</sup>。

发电机定子绕组电磁暂态过程相较于机电暂态过程衰减很快, 因此, 实际电力系统分析中, 通常选择五阶及以下阶次的发电机模型来提高计算效率<sup>[15]</sup>。五阶发电机模型通常应用于对精确度要求较高, 且需要较详细描述发电机状态的情况<sup>[16]</sup>, 本文算例即以五阶发电机模型下的电网电气量作为参照值。三阶发电机模型一般应用于对精度要求不高, 但是需要考虑发电机励磁模型的情况, 如多机大电网的振荡问题<sup>[17]</sup>。电力系统发展早期由于系统

运行参数较难得到, 经典模型得到广泛应用, 现在一般将其应用于电力系统规划<sup>[18]</sup>; 次暂态模型常应用于大规模故障计算中<sup>[5]</sup>。

## 1.3 适用于故障计算的发电机模型

电网实际故障计算中, 发电机模型通常采取图 1(a) 所示的简化次暂态模型。系统发生故障瞬间,  $E''$  不能突变, 且  $E''$  可利用故障前的系统运行状态求得, 因此, 该模型能够描述故障发生瞬间的电网电气量特性。

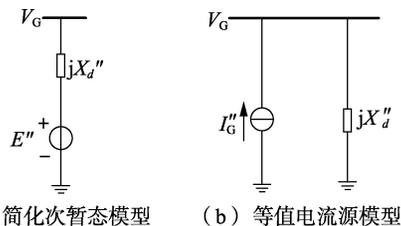


图 1 发电机次暂态模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of sub-transient generator model

图 1(b) 为等值电流源模型, 电流表达式为:

$$I''_G = E'' / (jX''_d) \quad (2)$$

其中,  $E''$  为恒定次暂态电势的矢量。

## 2 后备保护整定计算特征

后备保护一般通过与相邻线路的保护配合获得保护定值, 如近后备保护通常与相邻线路的主保护配合, 远后备保护则与相邻线路的近后备保护配合<sup>[4]</sup>。本文以接地距离保护 II 段和电流保护 II 段作为研究对象, 分析后备保护的整定计算特征。

图 2 为后备保护配合图, 图中, ①、②分别为本线路 MN 和相邻线路 NS 的保护; K 为故障点。

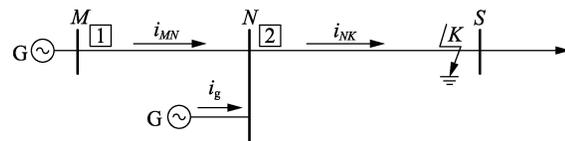


图 2 后备保护配合示意图

Fig.2 Schematic diagram of cooperation of backup protection

### 2.1 接地距离保护 II 段的整定计算

保护 1 的接地距离保护 II 段的整定公式<sup>[19]</sup>为:

$$\begin{cases} Z_{DZII.1} \leq K'_K Z_1 + K'_K K_Z Z_{DZI.2} \\ t_{II.1} \geq \Delta t \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $Z_{DZII.1}$ 、 $Z_{DZI.2}$  分别为保护 1 的接地距离保护 II 段、保护 2 的接地距离保护 I 段定值;  $K'_K$  为可靠系数, 取值为 0.8;  $Z_1$  为线路 MN 的正序阻抗;  $K_Z$  为助增系数;  $t_{II.1}$  为保护 1 的 II 段动作时间;  $\Delta t$  为时间级差, 通常取为 0.3~0.5 s<sup>[10]</sup>。

需要指出的是,  $K_Z$  与系统运行方式的变化有关, 其定义为流过相邻线路的故障电流与流过本线

路的故障电流之比<sup>[4]</sup>, 如式(4)所示。

$$K_Z = \frac{i_{NK}}{i_{MN}} = \frac{i_{MN} + i_g}{i_{MN}} = 1 + \frac{i_g}{i_{MN}} \quad (4)$$

为确保后备保护在最严苛的运行工况下也能可靠动作,  $K_Z$  应取不同运行方式下相邻线路保护 I 段的保护范围末端处发生不同类型故障时的最小助增系数, 并取正序助增系数与零序助增系数中的较小值<sup>[19]</sup>。

根据式(3)可得到保护 1 的接地距离保护 II 段与保护 2 的接地距离保护 I 段的配合动作关系, 如图 3 所示。

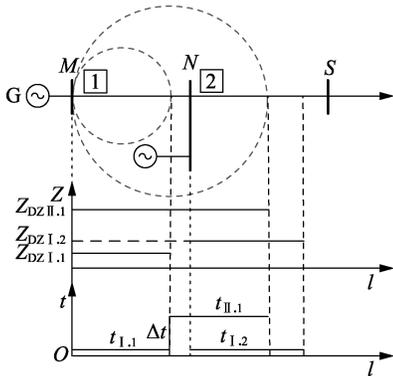


图 3 接地距离保护 II 段的动作特性

Fig.3 Characteristic of distance protection stage II

### 2.2 电流保护 II 段的整定计算

保护 1 的电流保护 II 段的整定公式<sup>[19]</sup> 如式(5)所示。

$$\begin{cases} I_{DZII,1} \geq K_K K_f I_{DZI,2} \\ t_{II,1} \geq \Delta t \end{cases} \quad (5)$$

$$I_{DZI,2} \geq K_K I_{end,2} \quad (6)$$

其中,  $I_{DZII,1}$ 、 $I_{DZI,2}$  分别为保护 1 的电流保护 II 段、保护 2 的电流保护 I 段定值;  $K_K$  为可靠系数, 取值为 1.2;  $K_f$  为分支系数, 且  $K_f$  与  $K_Z$  互为倒数;  $I_{end,2}$  为相邻线路末端发生故障时流经保护 2 的电流, 为确保保护在最严苛的运行工况下也能可靠动作,  $I_{end,2}$  应取不同运行方式下相邻线路末端发生不同类型故障时的最大故障电流。

根据式(5)可得到保护 1 的电流保护 II 段与保护 2 的电流保护 I 段的配合动作关系如图 4 所示。

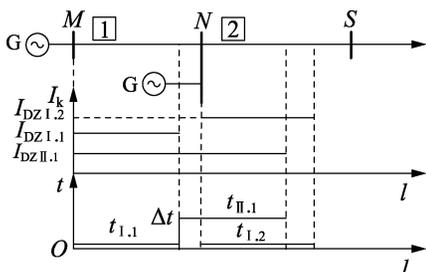


图 4 电流保护 II 段动作特性

Fig.4 Operating characteristic of current protection zone-II

从上述分析可以看出, 后备保护的整定计算具有以下特点:

a. 为了实现各级保护间的相互配合使得保护不拒动, 后备保护的整定需增加一定的延时, 即上级保护的動作时间应比下级保护的動作时间延长 1 个时间级差  $\Delta t$ ;

b. 为保证后备保护能够在最严苛的运行工况下合理动作, 保护定值的确定需进行大量的故障计算, 因此, 故障计算中发电机模型的选取将直接影响后备保护整定计算的准确性。

## 3 适用于后备保护整定计算的阶段式发电机模型

### 3.1 基本思路

现有整定计算中, 发电机模型通常采用如图 1 所示的次暂态模型, 即按照故障瞬时的电气量来确定保护定值, 但是后备保护的延时性使得短路电流随时间的变化不能忽略, 若仍使用次暂态模型将降低后备保护定值的精度。使用七阶或五阶发电机模型能够准确得到任意时刻的电网电气量, 但是该模型计及了发电机的动态过程, 当进行大量的故障计算时, 使用该模型将增加整定计算的复杂性和计算量。

实际上, 后备保护动作时间具有等分离散分布的特性, 如图 5 所示。在图 5 所示的单侧电源辐射型网络中, 各条线路的电流保护 III 段的动作时限是逐级配合的, 即本线路的动作时限相对下游线路增加了 1 个时间级差  $\Delta t$ 。令离电源最近的线路的后备保护动作时限为  $t_{min}$ , 最靠近电源的线路的后备保护动作时限为  $t_{max}$ , 各线路的动作时限以  $\Delta t$  为步长逐级递增, 则可以将时间均分为  $n$  等份, 定义整数倍步长为典型时间节点, 则只需关注故障发生后典型时间节点处的电网电气量, 就可以确定后备保护定值。

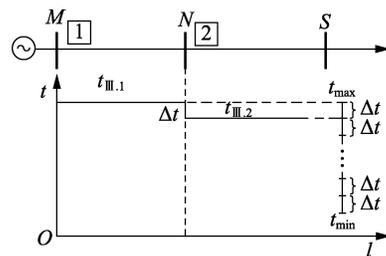


图 5 后备保护动作时间的等分离散分布特性

Fig.5 Divided discrete distributions of backup protection action time

如果能够获取典型时间节点处的电气量特性, 在典型时间节点之间维持电气量不变, 即采用阶段式静态发电机模型等效模拟五阶发电机模型, 则在简化模型的同时, 计及了发电机的动态特性, 提高了

后备保护的定值精度。下面以五阶发电机模型为例分析典型时间节点处的短路电流特性。

### 3.2 五阶发电机模型的机端短路电流分析

假定发电机励磁电压不变,发生短路后为维持各绕组磁链初值不变,暂态过程中定子、转子各绕组将产生各种电流分量,所有绕组的磁链都将发生变化,逐渐过渡到新的稳态值<sup>[20]</sup>。结合各电流分量的衰减,可得到只计及工频分量时的定子 a 相电流如式(7)所示。

$$\begin{cases} i_{d1} = \left[ \left( \frac{E''_{q0}}{X''_d} - \frac{E'_{q0}}{X'_d} \right) e^{-t/T''_d} + \left( \frac{E'_{q0}}{X'_d} - \frac{E_{q0}}{X_d} \right) e^{-t/T'_d} + \frac{E_{q0}}{X_d} \right] \times \\ \cos(\omega t + \theta_0) \\ i_{q1} = -\frac{E''_{d0}}{X''_q} e^{-t/T''_q} \sin(\omega t + \theta_0) \end{cases} \quad (7)$$

其中,  $\theta_0$  为短路前空载电动势和端电压之间的夹角;  $T''_d$  为次暂态时间常数,  $T'_d$  为暂态时间常数,  $T''_q$  为横轴阻尼绕组时间常数,  $T''_d$ 、 $T'_d$ 、 $T''_q$  通常由式(8)近似得到。

$$\begin{cases} T''_d \approx \frac{X''_d}{X'_d} T''_{d0} \\ T'_d \approx \frac{X'_d}{X_d} T'_{d0} \\ T''_q \approx \frac{X''_q}{X'_q} T''_{q0} \end{cases} \quad (8)$$

若计及自动励磁调节装置的作用,即发生短路故障使机端电压显著下降时,强行励磁装置将动作以增大励磁电流并恢复机端电压,其动作曲线可以用式(9)来近似拟合<sup>[20]</sup>。

$$U_f = U_{fn} + (U_{gf} - U_{fn})(1 - e^{-t/T_e}) \quad (9)$$

其中,  $U_{gf}$  为强行励磁顶值电压;  $U_{fn}$  为励磁额定电压;  $T_e$  为励磁系统的时间常数。

在强行励磁作用下,相应的定子电流增量  $i_{d2}$ 、 $i_{q2}$  如式(10)所示。

$$\begin{cases} i_{d2} = \frac{\Delta E_f}{X_d} \left[ 1 - \frac{(T'_d - T_{Dd}) T'_d}{(T'_d - T''_d)(T'_d - T_e)} e^{-t/T'_d} - \frac{(T''_d - T_{Dd}) T''_d}{(T''_d - T'_d)(T''_d - T_e)} e^{-t/T''_d} - \frac{(T_e - T_{Dd}) T_e}{(T_e - T''_d)(T_e - T'_d)} e^{-t/T_e} \right] \cos(\omega t + \theta_0) \\ i_{q2} = 0 \end{cases} \quad (10)$$

其中,  $\Delta E_f$  为强行励磁的顶值电势与空载电势的差值;  $T_{Dd}$  为阻尼绕组漏磁场时间常数,可近似取  $T_{Dd} = T''_{d0}/2$ 。

由式(7)和(10)可得到只计及工频分量时的定子 a 相电流如式(11)所示。

$$\begin{aligned} i_a = & \left[ \left( \frac{E''_{q0}}{X''_d} - \frac{E'_{q0}}{X'_d} \right) e^{-t/T''_d} + \left( \frac{E'_{q0}}{X'_d} - \frac{E_{q0}}{X_d} \right) e^{-t/T'_d} + \right. \\ & \left. \frac{E_{q0}}{X_d} \right] \cos(\omega t + \theta_0) + \frac{E''_{d0}}{X''_q} e^{-t/T''_q} \sin(\omega t + \theta_0) + \\ & \frac{\Delta E_f}{X_d} \left[ 1 - \frac{(T'_d - T_{Dd}) T'_d}{(T'_d - T''_d)(T'_d - T_e)} e^{-t/T'_d} - \right. \\ & \left. \frac{(T''_d - T_{Dd}) T''_d}{(T''_d - T'_d)(T''_d - T_e)} e^{-t/T''_d} - \right. \\ & \left. \frac{(T_e - T_{Dd}) T_e}{(T_e - T''_d)(T_e - T'_d)} e^{-t/T_e} \right] \cos(\omega t + \theta_0) \quad (11) \end{aligned}$$

式(11)中定子电流可以按照时间常数的不同,将其定义为 4 个电流分量的叠加,分别为基于次暂态时间常数的电流分量  $i''_{dq}$ 、基于暂态时间常数的电流分量  $i'_{dq}$ 、稳态电流分量  $i_{dq\infty}$  和基于励磁系统时间常数的电流分量  $i_e$ ,如式(12)所示。

$$i_a = i''_{dq} + i'_{dq} + i_{dq\infty} + i_e \quad (12)$$

### 3.3 典型时间节点处发电机机端短路电流采样

令短路开始时刻为 0,在每个  $\Delta t$  时间段内,以起始时刻的短路电流作为该时间段的采样值,结合式(11)和式(12)可以得到相应的阶段式发电机定子电流如式(13)所示。

$$\begin{aligned} i_a(t) = & K_1 \frac{E''_{q0}}{X''_d} + K_2 \frac{E'_{q0}}{X'_d} + K_3 \frac{E_{q0}}{X_d} + \\ & K_4 \frac{E''_{d0}}{X''_q} + K_5 \frac{\Delta E_f}{X_d} \quad (13) \end{aligned}$$

$$\begin{cases} K_1 = e^{-t/T''_d} \cos(\omega t + \theta_0) \\ K_2 = (e^{-t/T'_d} - e^{-t/T''_d}) \cos(\omega t + \theta_0) \\ K_3 = (1 - e^{-t/T'_d}) \cos(\omega t + \theta_0) \\ K_4 = e^{-t/T''_q} \sin(\omega t + \theta_0) \\ K_5 = \left[ 1 - \frac{(T'_d - T_{Dd}) T'_d}{(T'_d - T''_d)(T'_d - T_e)} e^{-t/T'_d} - \frac{(T''_d - T_{Dd}) T''_d}{(T''_d - T'_d)(T''_d - T_e)} e^{-t/T''_d} - \frac{(T_e - T_{Dd}) T_e}{(T_e - T''_d)(T_e - T'_d)} e^{-t/T_e} \right] \cos(\omega t + \theta_0) \end{cases} \quad (14)$$

因此,在时间段  $[t, t + \Delta t]$  内,发电机可以等效为由 5 个不同电势、不同电抗的发电机叠加而成,如图 6 所示。

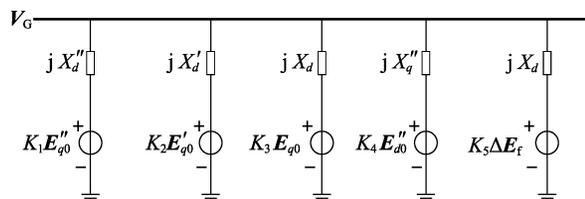


图 6 阶段式发电机模型示意图

Fig.6 Schematic diagram of stage generator model

### 3.4 阶段式发电机模型与次暂态模型的一致性

对于故障发生后的初始时间段  $[0, \Delta t]$ , 将  $t=0$  代入式(13)和式(14), 化简得到式(15)。

$$i_a = \frac{E''_{q0}}{X''_d} \cos \theta_0 + \frac{E''_{d0}}{X''_q} \sin \theta_0 \quad (15)$$

$$|i_a| = \sqrt{\left(\frac{E''_{q0}}{X''_d}\right)^2 + \left(\frac{E''_{d0}}{X''_q}\right)^2} \quad (16)$$

$$E'' = \sqrt{(E''_{q0})^2 + (E''_{d0})^2} \quad (17)$$

其中,  $X''_d$  与  $X''_q$  一般相差不大, 故式(15)可以等效为式(2)。

因此, 故障发生后初始时间段的阶段式发电机模型即为次暂态模型。

### 3.5 阶段式发电机模型的实用化处理

若短路故障不是发生在发电机机端, 而是在外接电抗  $X_e$  之后, 则式(8)中的电抗值  $X''_d, X'_d, X_d, X''_q, X'_q$  需分别相应地修正为  $X''_d+X_e, X'_d+X_e, X_d+X_e, X''_q+X_e, X'_q+X_e$ 。

若用  $T''_{d0}, T'_{d0}, T''_{q0}$  替换式(14)中的  $T''_d, T'_d, T''_q$ , 使得发电机系数仅与电机参数有关, 得到实用化后的发电机系数  $K_{10} \sim K_{50}$  如式(18)所示, 实用化后的等效模型如图 7 所示。

$$\begin{cases} K_{10} = e^{-t/T''_{d0}} \cos(\omega t + \theta_0) \\ K_{20} = (e^{-t/T'_d} - e^{-t/T''_{d0}}) \cos(\omega t + \theta_0) \\ K_{30} = (1 - e^{-t/T''_{d0}}) \cos(\omega t + \theta_0) \\ K_{40} = e^{-t/T''_{q0}} \sin(\omega t + \theta_0) \\ K_{50} = \left[ 1 - \frac{(T'_{d0} - T_{Dd}) T'_{d0}}{(T'_{d0} - T''_{d0})(T'_{d0} - T_e)} e^{-t/T'_{d0}} - \frac{(T''_{d0} - T_{Dd}) T''_{d0}}{(T''_{d0} - T'_d)(T''_{d0} - T_e)} e^{-t/T''_{d0}} - \frac{(T_e - T_{Dd}) T_e}{(T_e - T''_{d0})(T_e - T'_{d0})} e^{-t/T_e} \right] \cos(\omega t + \theta_0) \end{cases} \quad (18)$$

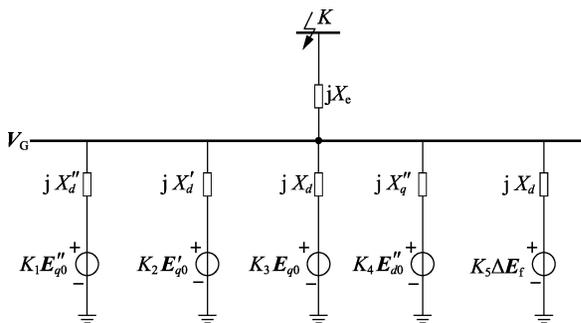


图 7 实用化阶段式发电机模型示意图

Fig.7 Schematic diagram of practical staged generator model

由式(8)可知, 阶段式发电机模型经过实用化处理后, 其各时间常数均有所增大。故障瞬时的电网电气量与时间常数无关, 所以该模型的实用化处

理不会影响故障瞬时的短路电流值。故障发生后, 时间常数的增大将使得定子电流各电流分量的衰减变慢, 短路电流值较实际值偏大。另外, 简化使得后备保护电流定值偏大, 但是仍能得到较现有整定计算准确的定值, 未影响后备保护整定计算定值性能, 且使得发电机系数不随故障点变化, 减少了计算量。

## 4 故障计算算例仿真

本文利用 DSP-BPA 中的暂态稳定程序对 IEEE 10 机 39 节点系统<sup>[12]</sup>进行仿真, 分析了现有后备保护整定计算中发电机模型的缺陷, 并验证了所提阶段式发电机模型的正确性。

### 4.1 发电机次暂态模型对整定计算的影响

结合后备保护整定计算的特征, 仿真分析现有整定计算中发电机模型对短路电流和助增系数的影响。

#### 4.1.1 次暂态模型对短路电流的影响

在 IEEE 39 节点系统中, 分别在线路 20-19 的首端、20%、40%、60%、80% 和末端处设置三相直接接地短路故障, 改变发电机模型, 仿真得到次暂态模型和五阶发电机模型下故障后流经该线路保护处的短路电流值  $I_{E''}, I_5$ 。

为进一步研究次暂态模型对短路电流精度的影响, 定义短路电流误差  $\Delta_1$  如式(19)所示。

$$\Delta_1 = (I_{E''} - I_5) / I_5 \times 100\% \quad (19)$$

仿真得到次暂态模型在 5 种故障位置下的短路电流误差如图 8 所示。

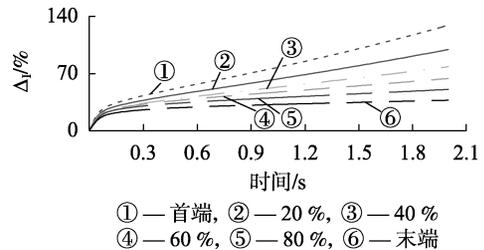


图 8 5 种故障位置下次暂态模型短路电流误差比较

Fig.8 Comparison of short circuit current error among five cases of distance

由图 8 可以看出, 短路电流误差随时间增大; 随着短路点的远离, 短路电流误差减小, 即发电机模型对短路电流精度的影响减小。线路首端发生短路故障后, 1 s 时短路电流误差接近 80%, 若仍采用次暂态模型下的短路电流进行后备保护整定计算, 将使得短路电流定值偏大, 保护过于严苛。

因此, 当短路点距离发电机较近时, 现有整定计算中的发电机模型将会大幅降低后备保护整定计算定值的精度。

#### 4.1.2 次暂态模型对助增系数的影响

根据变压器绕组接法, 发生不对称短路故障时, 变压器零序等值电路与连接在变压器外侧的发电机

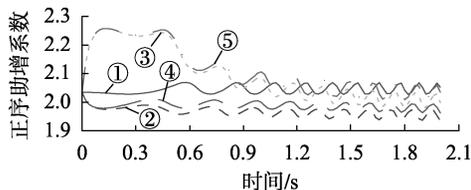
断开<sup>[20]</sup>,即发电机模型对零序助增系数无影响,且零序助增系数不随时间变化。由式(4)可知,正序助增系数的大小与 $i_{pq}$ 、 $i_g$ 的衰减快慢有关。若 $i_{pq}$ 比 $i_g$ 衰减的快,则 $K_z$ 随时间增大;反之 $K_z$ 随时间减小。而短路电流的衰减快慢与各绕组时间常数、故障点距离等有关。

假设线路 19-16 的末端发生三相直接接地短路,其中线路 33-19 为助增支路。参考南网实际系统数据,改变发电机 33 的次暂态、暂态时间常数如表 1 所示,得到表 1 中 4 种场景下采用五阶发电机模型时的正序助增系数变化曲线如图 9 所示。

表 1 发电机 33 和 34 的次暂态、暂态时间常数

Table 1 Data of sub-transient constant and transient time constant for Generator 33 and 34

场景	发电机	$T''_{d0}/s$	$T''_{q0}/s$	$T'_{d0}/s$	$T'_{q0}/s$
1	33	0.033	0.078	6.0	0.54
	34	0.033	0.078	6.0	0.54
2	33	0.600	0.600	6.0	0.54
	34	0.033	0.078	6.0	0.54
3	33	0.033	0.078	10.7	0.54
	34	0.033	0.078	6.0	0.54
4	33	0.600	0.600	10.7	0.54
	34	0.033	0.078	6.0	0.54



①—次暂态, ②—场景 1, ③—场景 2  
④—场景 3, ⑤—场景 4

图 9 4 种场景下助增系数比较

Fig.9 Comparison of assist coefficient among four cases

由图 9 可以看出:

a. 5 条曲线的起始点重合,即发电机模型的选取和时间常数的变化不影响故障瞬时的正序助增系数;

b. 以故障瞬时的正序助增系数为基准,4 种时间常数下,正序助增系数随时间的变化幅度均在 10% 以内,波动较小;

c. 正序助增系数随时间的变化与发电机的时间常数有关,比较场景 1 和 2 或场景 1 和 3 可以看到,增大发电机 33 的次暂态、暂态时间常数均将使正序助增系数增大;

d. 正序助增系数随时间小幅振荡,这是因为故障发生后,2 台发电机间存在功率互送,发生了机电振荡。

#### 4.2 阶段式发电机模型对整定计算短路电流的影响

忽略自动励磁装置的作用和负荷的影响,令 IEEE 39 节点系统中母线 19 处发生三相直接接地短

路,发电机 33 的部分参数(标么值)如表 2 所示。

表 2 发电机 33 的部分参数

Table 2 Essential parameters of Generator 33

参数	参数值	参数	参数值
$X_d$	0.895 8	$T''_{d0}$	0.033
$X_q$	0.864 5	$T''_{q0}$	0.078
$X'_d$	0.118 9	$\theta_0$	0
$X'_q$	0.196 9	$\Delta E_f$	0
$X''_d$	0.089	$E_{q0}$	0.999 7
$X''_q$	0.089	$E''_{q0}$	0.965 87
$T'_{d0}$	6	$E'_{q0}$	1.038 2
$T'_{q0}$	0.54		

由前述分析可知,后备保护整定计算只需考虑典型时间节点处的电气量特性,本文取 $\Delta t=0.3$  s,结合式(14)和式(18)可计算出阶段式和实用化阶段式模型各发电机系数标么值如表 3 所示。

表 3 阶段式与实用化阶段式模型的发电机系数

Table 3 Parameters of stage generator model

时间/s	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_{10}$	$K_{20}$	$K_{30}$
0	1	0	0	1	0	0
0.3	0	0.686 1	0.313 9	0.000 1	0.951 1	0.048 8
0.6	0	0.470 8	0.529 2	0	0.904 8	0.095 2
0.9	0	0.323 0	0.677 0	0	0.860 7	0.139 3
1.2	0	0.221 6	0.778 4	0	0.818 7	0.181 3
1.5	0	0.152 1	0.847 9	0	0.778 8	0.221 2
1.8	0	0.104 3	0.895 7	0	0.740 8	0.259 2

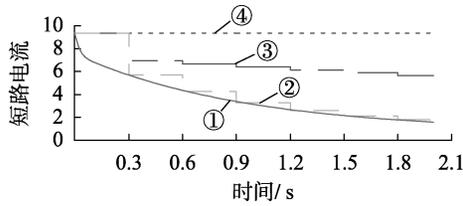
算例中未计及自动励磁装置的作用和负荷的影响,即 $\Delta E_f$ 和 $\theta_0$ 均取为 0,由式(14)可知, $K_4$ 、 $K_5$ 始终为 0。从表 3 可以看出,短路瞬间阶段式模型的发电机系数 $K_1=1$ , $K_2$ 、 $K_3$ 为 0;短路发生后, $K_1=0$ , $K_2$ 逐渐减小, $K_3$ 缓慢增大。结合式(14)可知, $K_1$ 、 $K_4$ 体现了发电机的次暂态过程, $K_2$ 体现了发电机的暂态过程, $K_3$ 、 $K_5$ 体现了发电机的稳态过程。实用化阶段式模型下的发电机系数 $K_{10}$ — $K_{30}$ 的变化方向和 $K_1$ — $K_3$ 一致,其变化趋势明显慢于 $K_1$ — $K_3$ ,这是因为实用化处理后的各时间常数均有所增大使得各系数变化更加平缓。

结合式(13)计算阶段式和实用化阶段式模型下后备保护典型时间节点处的短路电流值,并与次暂态模型和五阶发电机模型进行比较,结果如图 10 所示,图中短路电流为标么值。

由图 10 可以得出如下结论。

a. 阶段式发电机模型和实用化阶段式发电机模型均能获取故障瞬时的短路电流值,且 2 种模型下的短路电流均呈阶梯状减小趋势。

b. 阶段式发电机模型能够获取后备保护典型时间节点处的短路电流值;暂态过程中,阶段式发电机模型与五阶发电机模型有一定的误差,这是因为



①—5 阶发电机模型, ②—阶段式发电机模型  
③—实用化阶段式发电机模型, ④—次暂态模型

图 10 4 种发电机模型下短路电流的比较

Fig.10 Comparison of short circuit current among four generator models

式(13)中的时间常数  $T''_d, T'_d, T''_q$  通常由式(8)近似得到, 会产生一定的误差。

c. 实用化阶段式模型在典型时间节点处获得的短路电流值介于次暂态模型和 5 阶发电机模型之间。

### 4.3 阶段式发电机模型对整定计算正序助增系数的影响

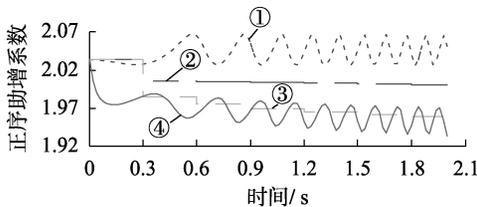
若 IEEE 39 节点系统中线路 19-16 的末端发生三相直接接地短路, 发电机 33 和 34 的部分参数标么值如表 4 所示。

表 4 发电机 33 和 34 的部分参数

Table 4 Essential parameters of Generator 33 and 34

发电机	$E_{q0}$	$E''_{q0}$	$E'_{q0}$
33	0.999 7	1.116	0.710 1
34	1.012 0	1.223	0.764 1

图 11 所示为 4 种发电机模型下的正序助增系数的变化曲线。



①—次暂态模型, ②—实用化阶段式发电机模型  
③—阶段式发电机模型, ④—5 阶发电机模型

图 11 4 种发电机模型下助增系数的比较

Fig.11 Assist coefficient comparison among four generator models

由图 11 可以看出:

a. 以故障瞬时的正序助增系数为基准, 故障后 2 s 内, 正序助增系数的变化幅度为 5% 左右;

b. 阶段式和实用化阶段式发电机模型均能获取故障瞬时的正序助增系数, 且 2 种模型下的正序助增系数均呈阶梯状变化;

c. 在误差允许范围内, 阶段式发电机模型能够获取后备保护典型时间节点处的正序助增系数;

d. 实用化阶段式发电机模型在典型时间节点处得到的正序助增系数介于次暂态模型和 5 阶发电机模型之间。

此外, 阶段式发电机模型在保证所得到的典型时间节点处的电气量的准确性的同时, 从短路后的某一时刻而言, 该模型仍采用恒定电势和恒定阻抗的组合, 未增加现有模型的复杂性。简化后的实用化阶段式发电机模型能够得到较次暂态模型更加准确的电气量, 且该模型下的发电机系数与故障位置无关, 易于工程应用。

## 5 后备保护整定计算实例仿真

### 5.1 电流保护 II 段的整定计算

选取南网 500 kV 主网中某电厂的发电机以及距离发电机较近的某线路, 在其相邻线路末端设置三相直接接地短路故障, 系统额定容量为 100 MV·A, 主要相关参数标么值如表 5 所示。

表 5 发电机主要相关参数

Table 5 Essential parameters of generator

参数	参数值	参数	参数值
$X_d$	1.8	$T'_{d0}$	9.67
$X_q$	1.75	$T''_{d0}$	0.044
$X'_d$	0.229	$T''_{q0}$	0.074
$X'_q$	0.382	$E_{q0}$	1.0
$X''_d$	0.174	$E''_{q0}$	0.946 8
$X''_q$	0.172	$E'_{q0}$	0.899 4

通过 DSP-BPA 仿真得到 0 s 和 0.3 s 时次暂态模型和 5 阶发电机模型下的短路电流值, 并根据式(13)、(14)和式(18)计算阶段式和实用化阶段式发电机模型下典型时间节点处的短路电流值, 结合式(5)得到 4 种模型下本线路电流保护 II 段定值如表 6 所示。

表 6 电流保护 II 段定值

Table 6 Current setting of current protection stage II

发电机模型	电流瞬时值/A	0.3 s 采样值/A	0.3 s 采样值误差/%	电流 II 段定值/A	电流定值误差/%
次暂态	1 021.77	1 021.77	30.3	1 471.35	30.3
5 阶	1 021.77	785.54	0	1 131.18	0
阶段式	1 021.77	785.54	0	1 131.18	0
实用化阶段式	1 021.77	906.87	15.4	1 305.89	15.4

由表 6 可以得出如下结论。

a. 以 5 阶发电机模型为基准, 各模型下的短路电流 0.3 s 采样值误差与电流保护 II 段定值误差相同, 这是因为电流 II 段定值与相邻线路末端最大故障电流呈正比关系。

b. 现有电流保护 II 段定值偏大, 与 5 阶发电机模型下的定值存在较大误差; 阶段式发电机模型考虑了后备保护动作时间下短路电流的衰减, 能够得到准确的定值; 实用化阶段式发电机模型下电流保护 II 段定值介于现有定值与准确定值之间, 误差比现有定值小一半。

从上述分析可以看出,若采用现有整定计算定值将使得后备保护过于严苛,阶段式发电机模型在未增加现有模型的复杂性的同时可以获得准确的电流保护 II 段定值,实用化阶段式发电机模型能够获得较现有后备保护整定计算较高精度的保护定值。

## 5.2 接地距离保护 II 段的整定计算

选取南网 500 kV 主网中某电厂的发电机以及距离发电机较近、有助增支路的某线路,在其相邻线路末端设置三相直接接地短路故障,需补充的相关参数有:发电机参数  $E'_{q0}$ 、 $E''_{q0}$  分别为 0.953 9 p.u.、1.209 p.u.,本线路正序阻抗与相邻线路正序阻抗分别为 0.013 09 p.u.、0.013 56 p.u.。

通过 DSP-BPA 仿真得到 0 s 和 0.3 s 时次暂态模型和五阶发电机模型下的短路电流值,并计算 4 种模型下典型时间节点处的正序助增系数,结合式(3)得到 4 种模型下本线路接地距离保护 II 段定值如表 7 所示。

表 7 接地距离保护 II 段定值

发电机模型	$K_z$ 瞬时值	0.3 s 采样值	0.3 s 采样值误差/%	距离保护 II 段定值/ $\Omega$	阻抗定值误差/%
次暂态	3.770 0	3.770 0	8.2	107.769 0	6.1
五阶	3.770 0	4.107 2	0	114.826 6	0
阶段式	3.770 0	4.107 2	0	114.826 6	0
实用化阶段式	3.770 0	3.985 1	3.0	113.177 3	2.2

由表 7 可以得到如下结论。

**a.** 以五阶发电机模型为基准,各模型下的接地距离保护 II 段定值误差略小于正序助增系数 0.3 s 采样值误差,这是因为式(3)右边第一项的存在削弱了助增系数对接地距离保护 II 段定值的影响。

**b.** 阶段式发电机模型能够得到准确的接地距离保护 II 段定值;实用化阶段式模型下的误差比现有接地距离保护 II 段定值误差小。

**c.** 现有接地距离保护 II 段定值误差为 6.1%,电流保护 II 段定值误差为 30%,接地距离保护 II 段定值误差远小于电流保护 II 段定值误差,这是因为正序助增系数的波动小且正序助增系数对接地距离保护 II 段定值的影响远小于短路电流对电流保护 II 段定值的影响。

从上述分析可以看出,在进行接地距离保护整定计算时,既可采用阶段式发电机模型也可采用现有模型,发电机模型对定值的影响不大。

## 6 结论

本文针对现有后备保护整定计算中发电机模型存在的缺陷,提出了一种适用于后备保护整定计算的阶段式发电机模型,通过分析得到如下结论:

**a.** 整定计算中,通常使用简化的发电机次暂态

模型来减少故障计算量,但是次暂态模型忽略了短路电流随时间的变化,后备保护的延时性使得后备保护整定计算的保护定值精度下降;

**b.** 所提出的阶段式发电机模型将发电机等效为阶段式静态模型,该模型考虑了电网电气量随时间的变化,并且能够获取后备保护典型时间节点处的短路电流值和正序助增系数,使得后备保护整定计算的保护定值更加准确,且从短路后的某一时刻而言,该模型仍采用恒定电势和恒定阻抗的组合,未增加现有模型的复杂性;

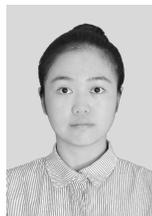
**c.** 为提高阶段式发电机模型的实用性,本文对该模型进行了一定的等效,进一步提出了实用化的阶段式发电机模型,该模型能够获得较现有后备保护整定计算较高精度的保护定值,且该模型下的发电机系数与故障位置无关,易于工程应用。

## 参考文献:

- [1] 何志勤,张哲,尹项根,等. 电力系统广域继电保护研究综述[J]. 电力自动化设备,2010,30(5):125-130.  
HE Zhiqin,ZHANG Zhe,YIN Xianggen,et al. Overview of power system wide area protection[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(5):125-130.
- [2] AE E,OE R,JA G. Simulation of protective relay performance under short-circuit and transient swing conditions[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2002,26(2):1108-1115.
- [3] 段献忠,杨增力,程道. 继电保护在线整定和离线整定的定值性能比较[J]. 电力系统自动化,2005,29(19):58-61.  
DUAN Xianzhong,YANG Zengli,CHENG Xiao. Performance analysis of relay settings determined according to off-line calculation and on-line calculation[J]. Automation of Electric Power Systems,2005,29(19):58-61.
- [4] 赵宇,王慧芳,王晓保,等. 基于增量因子的后备保护在线整定方法[J]. 电网技术,2014,38(1):269-274.  
ZHAO Yu,WANG Huifang,WANG Xiaobao,et al. Increment factors based online setting for backup protection[J]. Power System Technology,2014,38(1):269-274.
- [5] 李玮,尹刚志,东立荣. 继电保护整定计算中故障计算模型的选择和形成[J]. 华北电力技术,2010(5):25-28.  
LI Wei,YIN Gangzhi,DONG Lirong. Selection and formulation of fault calculation model for power relay projection calculation[J]. North China Electric Power,2010(5):25-28.
- [6] 吴红斌,丁明,李生虎,等. 发电机和负荷模型对暂态稳定性影响的概率分析[J]. 电网技术,2004,28(1):19-21,47.  
WU Hongbin,DING Ming,LI Shenghu,et al. Probabilistic analysis on influences of generator model and load model on transient stability[J]. Power System Technology,2004,28(1):19-21,47.
- [7] 靳希,段开元,张文青. 基于 PSS/E 的短路电流衰减影响因素分析[J]. 电力科学与技术学报,2010,25(3):61-65.  
JIN Xi,DUAN Kaiyuan,ZHANG Wenqing. Analysis of influencing factors on short-circuit decay base on PSS/E[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2010,25(3):61-65.
- [8] 张玮,潘贞存,赵建国. 新的防止大停电事故的后备保护减载控制策略[J]. 电力系统自动化,2007,31(8):27-31.  
ZHANG Wei,PAN Zhencun,ZHAO Jianguo. New load shedding control strategy for backup protection against cascading outages[J].

- Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(8):27-31.
- [9] 国家能源局. 国家能源局综合司关于做好电网安全运行的紧急通知[EB/OL]. (2016-06-27) [2017-08-20]. [http://www.nea.gov.cn/2016-06/27/c\\_135470144.htm](http://www.nea.gov.cn/2016-06/27/c_135470144.htm).
- [10] 毛锦庆,王澎. 从简化整定计算论线路的微机型继电保护装置[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(11):94-98.  
MAO Jinqing, WANG Peng. Discussion of microprocessor-based protection equipment on setting calculation simplification[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(11):94-98.
- [11] 倪以信,陈寿孙,张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京:清华大学出版社, 2002:45-59.
- [12] 余一平,宋忠鹏,鞠平,等. 同步发电机简化模型的等效阻尼系数分析[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(11):15-21.  
YU Yiping, SONG Zhongpeng, JU Ping, et al. Analysis of equivalent damping coefficient for simplified model of synchronous generator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(11):15-21.
- [13] 孙黎霞,鞠平,高运华,等. 基于 Park 模型的同步发电机参数辨识[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(19):50-56.  
SUN Lixia, JU Ping, GAO Yunhua, et al. Parameter estimation of synchronous generator based on Park model[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(19):50-56.
- [14] 薛卿. 同步发电机参数对不同假设模型影响的研究[D]. 保定:华北电力大学, 2011.  
XUE Qing. Research of the impact of synchronous generator parameters on models under hypotheses[D]. Baoding:North China Electric Power University, 2011.
- [15] 黄其新,孙黎霞,甄威,等. 同步发电机参数辨识的蚁群算法及扰动分析[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(11):50-53.  
HUANG Qixin, SUN Lixia, ZHEN Wei, et al. Ant colony optimization algorithm and disturbance analysis of synchronous generator parameter identification[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(11):50-53.
- [16] PRABHA K. Power system stability and control[M]. New York, USA: McGraw-Hill, 1994:33-65.
- [17] 崔小磊,赵书强,闫健杰. 快速求解多机系统机电振荡模式的新算法[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(6):36-39.  
CUI Xiaolei, ZHAO Shuqiang, YAN Jianjie. Electromechanical mode fast calculation of multi-machine power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(6):36-39.
- [18] 陶华,许津津,邹文聪. BPA 向 PSCAD 模型转换的研究[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(8):152-156.  
TAO Hua, XU Jinjin, ZOU Wencong. Model conversion from BPA to PSCAD[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(8):152-156.
- [19] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 220 kV~750 kV 电网继电保护装置运行整定规程:DL/T559—2007[S]. 北京:中国电力出版社, 2007.
- [20] 何仰赞,温增银. 电力系统分析(上册)[M]. 3 版. 武汉:华中科技大学出版社, 2002:129-130, 175.

#### 作者简介:



雷 淇

雷 淇(1995—),女,湖北武穴人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统继电保护整定和校核计算(**E-mail**: qilei@hust.edu.cn);

李银红(1976—),女,湖北武汉人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统继电保护整定计算和直流保护故障特性分析与整定等(**E-mail**: liyinhong@hust.edu.cn)。

### Stage generator model for backup protection setting calculation

LEI Qi<sup>1,2</sup>, WANG Xiaoyang<sup>3</sup>, LIU Yadong<sup>3</sup>, YU Ruiji<sup>4</sup>, SHI Dongyuan<sup>1,2</sup>, LI Yinhong<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. Hubei Electric Power Security and High Efficiency Key Laboratory, School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China 3. State Key Laboratory of Power Grid Safety and Energy Conservation, China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 4. State Grid Xuzhou Power Supply Company, Xuzhou 221000, China)

**Abstract:** The sub-transient generator model is commonly used in protection setting calculation to simplify calculation, but it does not consider that short circuit current decays along with time, and the backup protection has the feature of time delay. The accuracy of protection setting values will be reduced by using the sub-transient generator model in backup protection setting calculation. In order to improve the accuracy of backup protection setting calculation, a stage generator model is proposed. Based on the electrical characteristics of generator at the typical time of backup protection, the equivalent static generator model can be obtained and then the stage generator model suitable for backup protection setting calculation can be formed. Simulation based on IEEE 39-bus system verifies that the stage generator model can improve the accuracy of backup protection setting calculation.

**Key words:** relay protection; backup protection; protection setting calculation; stage generator model; short circuit current; current assistance coefficient