

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.226225

# 基于内部故障仿真的可变速抽水蓄能发电电动机 定子侧主保护优化配置研究

尹项根<sup>1</sup>, 乔健<sup>1</sup>, 王义凯<sup>1</sup>, 谭力铭<sup>1</sup>, 卢庆辉<sup>1</sup>, 李伟<sup>2</sup>

(1. 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学), 湖北 武汉 430074;  
2. 国网新源控股有限公司抽水蓄能技术经济研究院, 北京 100053)

**摘要:** 大型可变速抽水蓄能机组具有交流励磁和变速恒频发电的特点, 研究其内部故障仿真建模方法对明确其主保护最优配置方案有实用意义。首先, 基于分支电压方程和磁链方程建立可变速抽水蓄能发电电动机的通用数学计算模型, 能够实现对并网满载工况下定子绕组内部短路故障和开焊断线故障的暂态仿真。仿真结果中两类故障的故障特征与理论分析一致, 验证了该数学计算模型的正确性。然后, 根据定子绕组的绕线规律分析可能发生的短路故障和断线故障情况, 利用所建立的数学模型对所有故障情况进行仿真计算。最后, 经量化分析比较, 发现主保护配置方案为: “零序横差电流保护+裂相横差电流保护+完全纵差电流保护” 时保护覆盖范围最大。

**关键词:** 可变速抽水蓄能机组; 内部短路故障; 开焊断线故障; 主保护优化

## Optimal configuration of main protection for a variable speed pumped storage power generator based on internal fault simulation

YIN Xianggen<sup>1</sup>, QIAO Jian<sup>1</sup>, WANG Yikai<sup>1</sup>, TAN Liming<sup>1</sup>, LU Qinghui<sup>1</sup>, LI Wei<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. Pumped-Storage Technological & Economic Research Institute, State Grid Xinyuan Company Ltd., Beijing 100053, China)

**Abstract:** The large-scale variable-speed pumped storage unit has the characteristics of alternating current excitation and variable-speed constant-frequency power generation. It is of practical significance to study the internal fault simulation to clarify the optimal configuration scheme of its main protection. First, a general mathematical calculation model of a variable-speed pumped storage power generation motor is established based on the branch voltage equation and flux linkage equation. This can realize the transient simulation of the internal short-circuit fault and the open-welding line fault of the stator winding under grid-connected full load condition. The fault characteristics of the two types of faults in the simulation results are consistent with the theoretical analysis, and this verifies the correctness of the mathematical calculation model. Then, all possible short-circuit faults and disconnection faults are analyzed according to the winding law of the stator winding, and the established mathematical model is used to simulate and calculate all faults. Finally, it is found that the protection coverage is the best when the main protection configuration scheme is ‘zero sequence transverse and split phase transverse and complete longitudinal differential current protection’ through quantitative analysis and comparison.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51877089).

**Key words:** variable speed pumped storage unit; internal short circuit fault; open welding fault; main protection optimization

## 0 引言

为适应大规模高比例新能源发展需要, 助力实

现碳达峰、碳中和目标。国家能源局发布《抽水蓄能中长期发展规划(2021-2035年)》(以下简称《规划》)。《规划》要求加快抽水蓄能电站建设, 到2025年, 抽水蓄能投产总规模较“十三五”翻一番, 达到6200万kW以上; 到2030年, 抽水蓄能投产总

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51877089)

规模较“十四五”再翻一番，达到 1.2 亿 kW 以上。相较于传统抽水蓄能机组，可变速抽水蓄能机组具有功率双向实时可调、响应快和效率高的优点<sup>[1-5]</sup>，摆脱了传统机组仅作为计划调峰调频的限制，在日本和欧洲等地已广泛应用<sup>[6-8]</sup>。但在中国，该技术的研究正处于起步阶段，对该类机组的故障机理研究较少，且缺乏有效的故障仿真分析手段。

可变速抽水蓄能机组采用交流励磁和双馈结构<sup>[9]</sup>，其工作原理和故障特性与同步机组有很大区别<sup>[10-12]</sup>，亟需对其内部故障特性和保护方案开展系统研究。文献[13]基于多回路理论分析了转子绕组短路故障时定子分支环流的谐波特征，并提出相应的转子绕组短路故障保护方法。文献[14]分析了变速抽水蓄能机组发生定子绕组短路故障时的回路方程，并建立空载和带电阻负载两种工况下的仿真模型。但仍缺乏对该类机组在并网满载运行工况下发生定子绕组短路故障和开焊断线故障的研究。变速抽水蓄能机组可能发生的内部故障数目众多，无法直接利用成本高昂的真机进行多次破坏性试验，以其主保护配置方案进行量化分析。因此，亟需通过建立变速抽水蓄能机组的仿真模型对保护性能进行研究。

可变速抽水蓄能机组在发电工况下的工作原理与双馈风机相似。文献[15]根据定子绕组匝间短路后会产生负序分量的特征，将派克矢量的椭圆轨迹作为判断依据，以实现定子绕组匝间短路的故障辨识。文献[16]基于支持向量机和 D-S 证据理论，采用扩展派克变换和失电残压结合的方法实现定子绕组匝间短路的故障诊断。文献[17]提出将电流估计差作为特征量用于定子绕组匝间短路的故障诊断，该方法能够定位故障相且具有较高的鲁棒性。上述研究均侧重于电机内部故障的诊断与辨识。但可变速抽水蓄能机组的单机容量远大于双馈风机，发生定子绕组短路故障时，短路电流巨大<sup>[18]</sup>，极易烧毁机组。相较于故障诊断，大型可变速抽水蓄能机组应着重关注其主保护动作性能，使主保护尽可能多地有效覆盖所有可能发生的故障。在发生定子绕组短路故障或开焊断线故障后，第一时间保护动作并停机，避免机组被烧毁。

本文首先基于定、转子多分支电压及磁链方程，对额定并网满载工况下可变速抽水蓄能机组的内部短路故障和开焊断线故障建立数学仿真模型。该模型考虑了交流励磁和转子转速可变的特点，适用于所有的双馈式可变速抽水蓄能机组。然后，以某台实际的变速机组为例，根据其绕线规律分析所有可能发生的短路故障情况，对故障匝差分布进行统计。最后，利用所建立的数学仿真模型对所有内部短路

故障和开焊断线故障进行仿真计算，并校验主保护的動作性能，经分析比较得到最优的主保护配置方案。本文研究可为后续可变速抽水蓄能机组的主保护配置提供借鉴。

### 1 可变速抽水蓄能机组的内部故障数学模型

内部故障数学模型实质上是由定、转子各回路电压及磁链方程的数学关系得到的。由于可变速抽水蓄能发电电动机的定、转子均是绕线绕组形式，可将正常运行状态各定、转子分支等效为电感和电阻的串联，对定、转子支路的电压电流关系均采用发电机惯例，如图 1 所示。

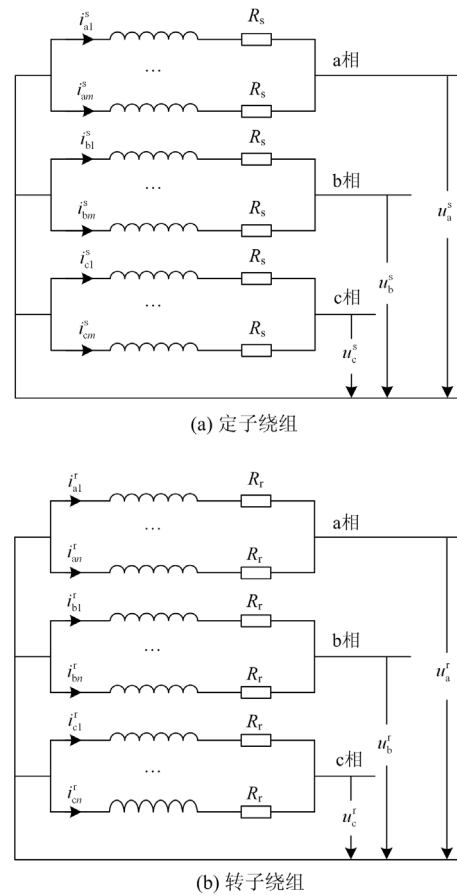


图 1 定、转子绕组等效电路图

Fig. 1 Equivalent circuit diagram of stator and rotor windings

图中，定子绕组每相  $m$  分支，转子绕组每相  $n$  分支。 $i$  和  $u$  分别表示分支电流和电压。角标  $s$  和  $r$  分别表示定子侧和转子侧的电气量。采用正电流产生正磁链规则，可得定、转子各分支电压方程为

$$p \begin{bmatrix} \psi_s \\ \psi_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_s & \\ & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_s \\ U_r \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中： $p$  为微分算子； $\psi_s$  和  $\psi_r$  分别为定、转子支路

磁链;  $I_s$  和  $I_r$  分别为定、转子支路电流;  $U_s$  和  $U_r$  分别为定、转子支路电压;  $R_s$  和  $R_r$  分别为定、转子支路电阻。具体可表示为

$$\begin{cases} \psi_s = [\psi_{a1}^s, \psi_{a2}^s, \dots, \psi_{am}^s, \psi_{b1}^s, \psi_{b2}^s, \dots, \psi_{bm}^s, \psi_{c1}^s, \psi_{c2}^s, \dots, \psi_{cm}^s]^T \\ \psi_r = [\psi_{a1}^r, \psi_{a2}^r, \dots, \psi_{an}^r, \psi_{b1}^r, \psi_{b2}^r, \dots, \psi_{bn}^r, \psi_{c1}^r, \psi_{c2}^r, \dots, \psi_{cn}^r]^T \\ I_s = [i_{a1}^s, i_{a2}^s, \dots, i_{am}^s, i_{b1}^s, i_{b2}^s, \dots, i_{bm}^s, i_{c1}^s, i_{c2}^s, \dots, i_{cm}^s]^T \\ I_r = [i_{a1}^r, i_{a2}^r, \dots, i_{an}^r, i_{b1}^r, i_{b2}^r, \dots, i_{bn}^r, i_{c1}^r, i_{c2}^r, \dots, i_{cn}^r]^T \\ U_s = [-u_a^s, \dots, -u_a^s, -u_b^s, \dots, -u_b^s, -u_c^s, \dots, -u_c^s]^T \\ U_r = [-u_a^r, \dots, -u_a^r, -u_b^r, \dots, -u_b^r, -u_c^r, \dots, -u_c^r]^T \\ R_s = \text{diag}(R_s, R_s, \dots, R_s) \\ R_r = \text{diag}(R_r, R_r, \dots, R_r) \end{cases} \quad (2)$$

根据电路理论分析, 分别对定、转子各分支电压方程相邻作差得到网孔回路。为此, 引入关联矩阵  $E_s$  和  $E_r$ 。

$$E_s = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & -1 \end{bmatrix}_{(3m-1) \times 3m} \quad (3)$$

$$E_r = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & -1 \end{bmatrix}_{(3n-1) \times 3n} \quad (4)$$

将关联矩阵  $E_s$  和  $E_r$  代入式(1)可得

$$p \begin{bmatrix} E_s \psi_s \\ E_r \psi_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_s E_s & \\ & R_r E_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U'_s \\ U'_r \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中,  $U'_s = E_s U_s$ ,  $U'_r = E_r U_r$ 。具体为

$$\begin{cases} U'_s = [0, \dots, 0, -u_{ab}^s, 0, \dots, 0, -u_{bc}^s, 0, \dots, 0]^T \\ U'_r = [0, \dots, 0, -u_{ab}^r, 0, \dots, 0, -u_{bc}^r, 0, \dots, 0]^T \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $u_{ab}^s$  和  $u_{bc}^s$  分别为定子侧机端 ab 相和 bc 相线电压;  $u_{ab}^r$  和  $u_{bc}^r$  分别为转子侧励磁 ab 相和 bc 相线电压。

考虑到定子中性点经大电阻接地, 接地线上电流几乎为 0。因此, 定子各分支电流的约束条件如式(7)所示。

$$i_{a1}^s + \dots + i_{am}^s + i_{b1}^s + \dots + i_{bm}^s + i_{c1}^s + \dots + i_{cm}^s = 0 \quad (7)$$

同理, 转子中性点为不接地形式, 转子各分支电流的约束条件如式(8)所示。

$$i_{a1}^r + \dots + i_{an}^r + i_{b1}^r + \dots + i_{bn}^r + i_{c1}^r + \dots + i_{cn}^r = 0 \quad (8)$$

因此, 引入约束矩阵  $D_s$  和  $D_r$  来考虑约束条件。具体为

$$D_s = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \\ -1 & -1 & \dots & -1 & -1 \end{bmatrix}_{3m \times (3m-1)} \quad (9)$$

$$D_r = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \\ -1 & -1 & \dots & -1 & -1 \end{bmatrix}_{3n \times (3n-1)} \quad (10)$$

将约束矩阵  $D_s$  和  $D_r$  代入式(5)可得

$$p \begin{bmatrix} E_s \psi_s \\ E_r \psi_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_s E_s & \\ & R_r E_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_s I'_s \\ D_r I'_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U'_s \\ U'_r \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中,  $I'_s = D_s^{-1} I_s$ ,  $I'_r = D_r^{-1} I_r$ 。具体为

$$\begin{cases} I'_s = [i_{a1}^s, i_{a2}^s, \dots, i_{am}^s, i_{b1}^s, i_{b2}^s, \dots, i_{bm}^s, i_{c1}^s, i_{c2}^s, \dots, i_{cm}^s]^T \\ I'_r = [i_{a1}^r, i_{a2}^r, \dots, i_{an}^r, i_{b1}^r, i_{b2}^r, \dots, i_{bn}^r, i_{c1}^r, i_{c2}^r, \dots, i_{cn}^r]^T \end{cases} \quad (12)$$

另一方面, 定、转子的磁链方程为

$$\begin{bmatrix} \psi_s \\ \psi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ss} & L_{sr} \\ L_{rs} & L_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中:  $L_{ss}$  为  $3m \times 3m$  阶定子电感矩阵;  $L_{rr}$  为  $3n \times 3n$  阶转子电感矩阵; 定、转子互感矩阵  $L_{sr}$  和  $L_{rs}$  为定、转子互感矩阵。将式(13)代入式(11)可得

$$\begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p I'_s \\ p I'_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N_{11} & N_{12} \\ N_{21} & N_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I'_s \\ I'_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U'_s \\ U'_r \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中:

$$\begin{aligned} M_{11} &= E_s L_{ss} D_s; & M_{12} &= E_s L_{sr} D_r; & M_{21} &= E_r L_{rs} D_s; \\ M_{22} &= E_r L_{rr} D_r; & N_{11} &= R_s E_s D_s; & N_{12} &= E_s p L_{sr} D_r; \\ N_{21} &= E_r p L_{rs} D_s; & N_{22} &= R_r E_r D_r. \end{aligned}$$

$M_{12}$ 、 $M_{21}$ 、 $N_{12}$  和  $N_{21}$  是时变的, 利用四阶龙格库塔算法求解此变系数微分方程组, 即可计算发电电动机正常运行时各分支电流的瞬态值。

定子侧各种内部短路故障(同相同分支短路故障、同相异分支短路故障和异相短路故障)下仿真模型数学表达式的详细推导可参考文献[19-20], 本文主要就该模型对主保护优化配置方案进行研究。

发电电动机正常运行中突然发生开焊断线故障时, 从定子三相电流和为 0 的角度进行假设, 假设开焊分支所在相的相电流不突变, 即故障相非故障分支电流突变至故障前的  $m/(m-1)$  倍。而非故障分

支(包括定子分支和转子分支)的电流不突变。对开焊故障处理时,去掉开焊分支后即可建立相应电压方程,即与定子相关的所有矩阵均需要降阶。如电感矩阵  $L_{ss}$ 、 $L_{sr}$ 、 $L_{rs}$  的阶次由  $3m \times 3m$ 、 $3m \times 3n$  和  $3n \times 3m$  降阶为  $(3m-1) \times (3m-1)$ 、 $(3m-1) \times 3n$  和  $3n \times (3m-1)$ , 常系数矩阵  $E_s$ 、 $D_s$  也相应降一阶。此外,约束条件式(7)也应去掉开焊分支电流。

对于  $U'_s = [0, \dots, 0, -u_{ab}^s, 0, \dots, 0, -u_{bc}^s, 0, \dots, 0]^T$ , 需根据开焊分支所在位置进行一定的变化, 如式(15)。

$$\begin{cases} U'_s = [0, \dots, 0, -u_{ab}^s, 0, \dots, 0, -u_{bc}^s, 0, \dots, 0]^T & \text{a相开焊} \\ U'_s = [0, \dots, 0, -u_{ab}^s, 0, \dots, 0, -u_{bc}^s, 0, \dots, 0]^T & \text{b相开焊} \\ U'_s = [0, \dots, 0, -u_{ab}^s, 0, \dots, 0, -u_{bc}^s, 0, \dots, 0]^T & \text{c相开焊} \end{cases} \quad (15)$$

在做上述调整后即可形成开焊电压方程, 最终形式类同于式(14)。

计算电感矩阵参数是求解式(14)的基础。假设不考虑齿槽影响, 认为气隙均匀。参考文献[19]可对电感矩阵参数  $L_{ss}$ 、 $L_{sr}$ 、 $L_{rs}$  和  $L_{rr}$  进行计算。由于本文主要对主保护优化配置进行研究, 具体的电感计算方法不再赘述。

## 2 基本参数及内部短路故障集生成

以某台可变速抽水蓄能机组为例验证所提的内部故障仿真模型, 该机组的基本参数如表 1 所示。定子绕组共有 252 匝线圈。若对任意两匝线圈考虑短路故障下的主保护性能, 故障数量庞大, 没有实际意义。定子绕组内部短路故障主要考虑槽内和端部因绝缘损坏等原因造成的线棒短路故障。对于槽内故障, 顾名思义, 短路故障发生在同一槽内的 2 根线棒。可能发生的短路故障数目等于定子总槽数, 记为  $Z$ 。对于端部故障, 由于定子绕组采用双层叠绕组的绕线形式, 根据文献[21], 可能发生的端部

表 1 某台可变速机组的基本参数

参数	定子	转子
槽数 $Z$	252	294
绕组形式	双层叠绕组	双层波绕组
极对数 $P$	7	7
并联支路数	4	2
第一节距 $y_1$	15	21
第二节距 $y_2$	14	21
额定电流/A	12 317	6 400
气隙/mm	15	15

短路故障数目为  $Z(y_1 + y_2 - 2)$  种, 其中  $y_1$  为第一节距,  $y_2$  为第二节距。

该机组三相各分支的槽号分布情况如图 2 所示, 每相绕组均匀地分布在定子铁芯圆周上。根据槽号分布情况可推断其内部故障形式具有以下特点<sup>[22-23]</sup>: (1) 叠绕组绕线形式使同分支中匝号相邻的线圈分布比较集中, 会导致同相同分支短路故障的匝差普遍较小; (2) 每相四分支只有少部分在槽号分布图上首尾交叠, 会导致同相异分支短路故障数目较少。经分析统计, 该变速机组的定子绕组内部短路故障数目如表 2 所示, 同相异分支短路故障数目最少。对同相同分支短路故障匝差进行统计, 统计结果如图 3 所示。可以发现, 小匝差故障(1~2 匝)占比高达 52.66%, 且最大匝差不超过 8 匝, 与上述分析一致。

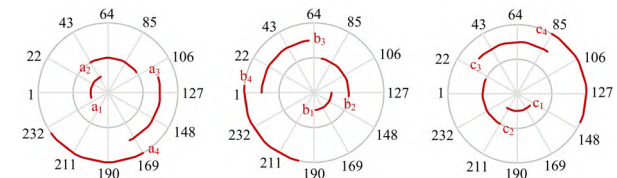


图 2 三相各分支的槽号分布

Fig. 2 Slot number distribution of each branch

表 2 短路故障数目统计

	同相同分支	同相异分支	异相	总数
槽内故障	96	30	126	252
端部故障	1 146	156	5 502	6 804
故障总数	1 242	186	5 628	7 056

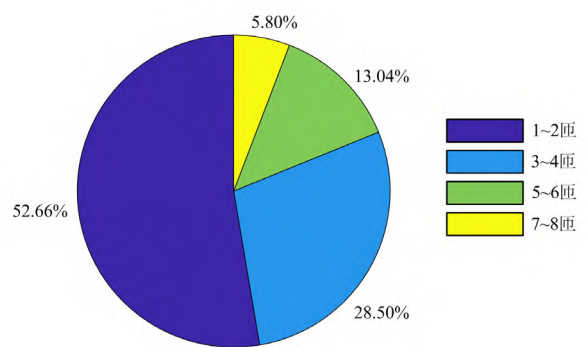


图 3 同相同分支短路故障匝差统计

Fig. 3 Statistics of turns difference of short circuit faults in the same branch

对故障统计结果进一步观察, 发现同相异分支短路故障中的小匝差故障均发生在每相的 1、4 分支或 2、3 分支。针对该特点, 采用中性点相邻分支组

合形式(1、2分支为一组, 3、4分支为一组, 构成裂相横差保护), 可将该类故障的短路环电流引入裂相横差保护差动回路中<sup>[24]</sup>, 有利于提高保护灵敏度。因此, 分支接线方式如图4所示, 构成的主保护有(以A相为例): (1) 单元件零序横差保护 CT01; (2) 完全裂相横差保护 CT2-CT3; (3) 完全纵差保护 CT1-(CT2+CT3); (4) 不完全纵差保护 CT1-CT2, CT1-CT3。保护判据采用南瑞保护 PCS-985GW, 保护定值采用《导则》推荐定值。

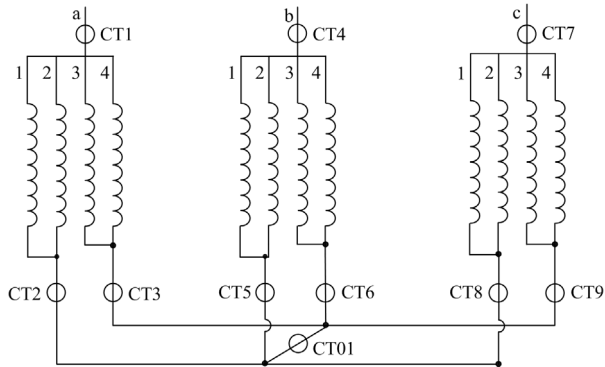


图4 分支接线形式

Fig. 4 Form of branch connection

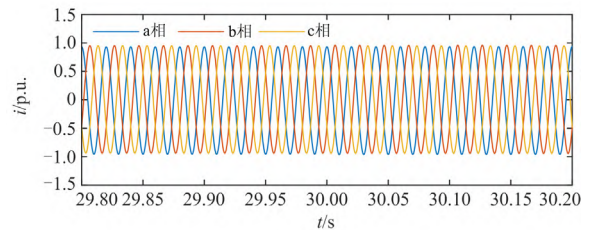
### 3 内部故障仿真与主保护优化配置

#### 3.1 内部短路故障

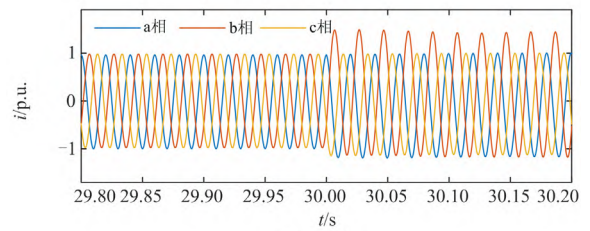
基于所建立的内部故障仿真模型, 对前述可变速机组在额定并网满载工况(对应转速为433.5 r/min, 转差率为-0.0115)下的定子绕组内部短路故障进行仿真分析。分别以故障特征微弱的小匝差同相分支短路故障和故障特征明显的异相短路故障为例进

行说明。故障一: b相第3分支第15匝线圈与b相第3分支第16匝线圈发生短路故障; 故障二: a相第1分支第1匝线圈与b相第4分支第11匝线圈发生短路故障。故障时刻为30s, 仿真得到机端三相电流瞬时值波形, 如图5所示, 机端各分支电流瞬时值如图6所示, 各电流值均为标么值。

可以发现, 对于故障特征微弱的小匝差匝间短路故障, 故障后三相电流几乎保持对称, 且各分支电流变化较小。但异相短路故障时三相电流畸变较大, 完全不对称, 各分支电流有的变大, 有的变小。最大电流分支的电流可能会较其额定电流增加很多, 使其严重过载过热, 最终导致机组严重损坏。



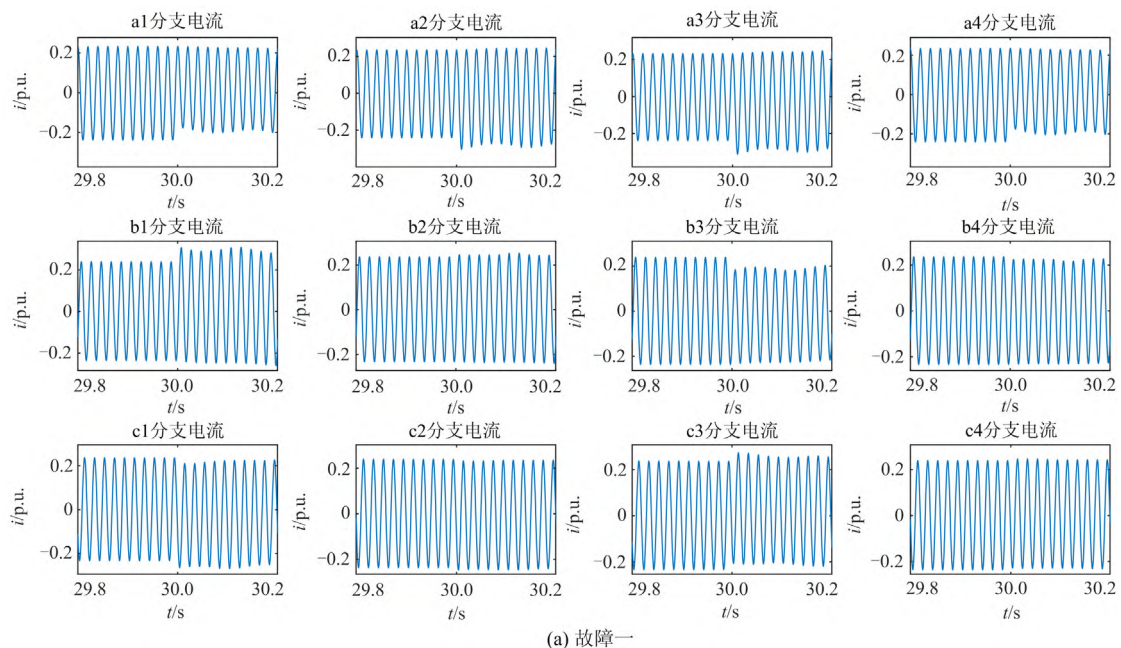
(a) 故障一



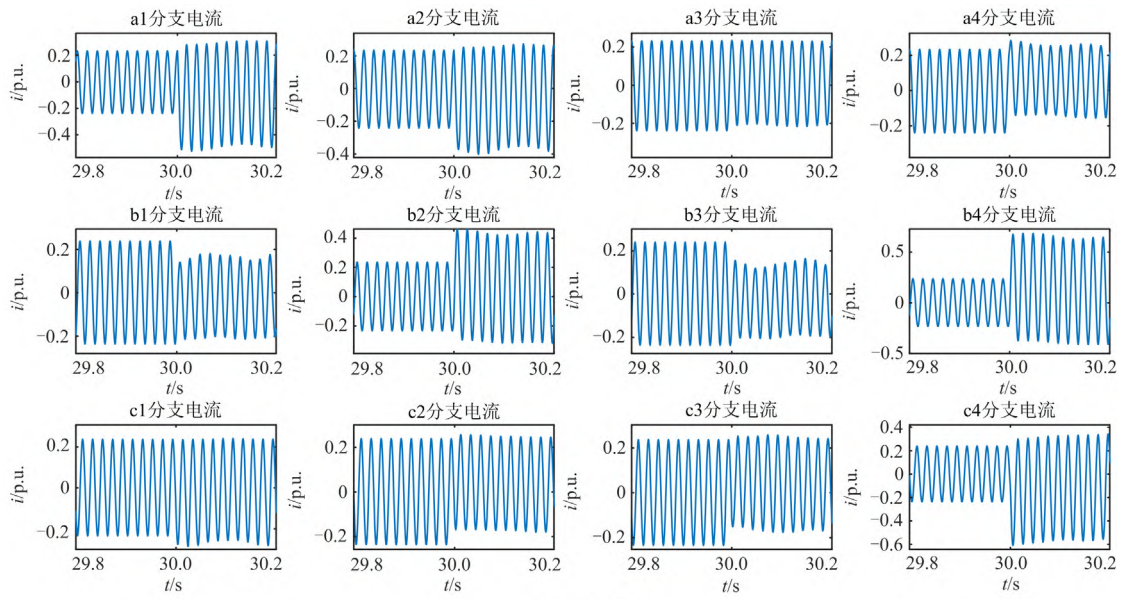
(b) 故障二

图5 机端三相电流瞬时值

Fig. 5 Instantaneous value of three phase current of generator



(a) 故障一

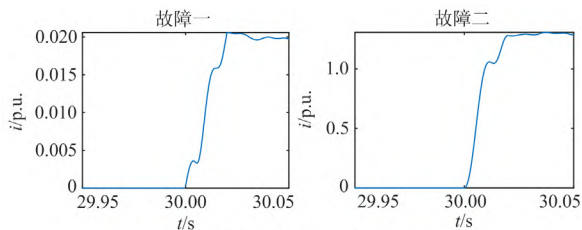


(b) 故障二

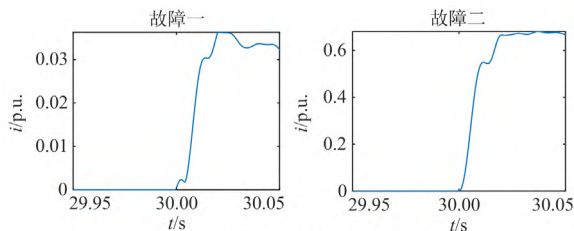
图 6 机端各分支电流瞬时值

Fig. 6 Instantaneous current of each branch of generator

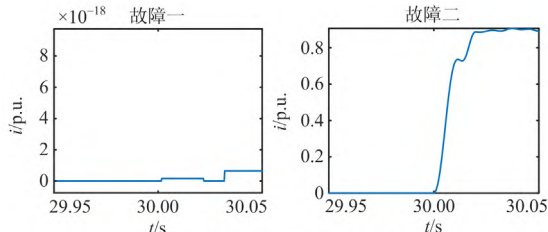
对图 4 中各 CT 采集的电流信号进行数字滤波和全周傅氏运算, 得到零序横差电流、裂相横差电流、完全纵差电流和不完全纵差电流的基频有效值变化情况, 如图 7 所示。可以发现, 对于小匝差匝间短路故障的故障一而言, 各类主保护均达不到保



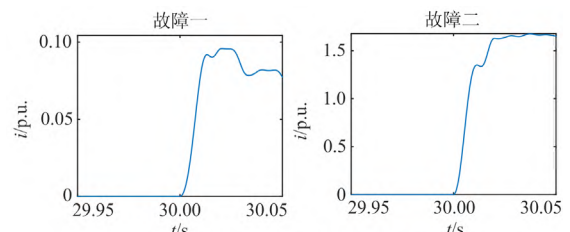
(a) 零序横差电流有效值



(b) B相裂相横差电流有效值



(c) B相完全纵差电流有效值



(d) B相不完全纵差电流有效值

图 7 各主保护动作电流的有效值

Fig. 7 Effective value of each main protection action current

护起动作门槛(零序横差保护的起动作门槛为  $0.05I_N$ , 裂相横差保护与纵差保护的起动作门槛为  $0.2I_N$ )。但对于异相短路故障的故障二, 各类主保护均可达到起动作门槛, 侧面验证了所提建模方法的有效性。

当单独配置零序横差保护或裂相横差保护时, 对表 2 中所有故障情况进行仿真计算, 两种保护的故障动作情况如表 3 和表 4 所示。可以看出, 零序横差和裂相横差保护对所有故障类型都具有一定的保护作用。其中, 同相同分支短路故障是二者共同的薄弱环节, 需要重点防范。

表 3 单独配置零序横差保护的故障动作情况

Table 3 Fault action of zero-sequence transverse

	differential protection			
	同相同分支	同相异分支	异相	总计
槽内	90(96)	21(30)	126(126)	237(252)
端部	664(1 146)	138(156)	5 474(5 502)	6 276(6 804)
总计	754(1 242)	159(186)	5 600(5 628)	6 513(7 056)

表 4 单独配置裂相横差保护的故障动作情况

Table 4 Fault action of split-phase transverse differential protection

	同相同分支	同相异分支	异相	总计
槽内	86(96)	23(30)	126(126)	235(252)
端部	840(1 146)	144(156)	5 462(5 502)	6 446(6 804)
总计	926(1 242)	167(186)	5 588(5 628)	6 681(7 056)

根据工程经验, 通常会同时配置双横差保护<sup>[25]</sup>(零序横差保护和裂相横差保护), 以求两种保护对故障存在一定的互补效果。对所有故障情况进行仿真计算, 双横差保护的故障动作情况如表 5 所示, 有 6 776 种故障可以动作(占总故障数目的 96.0%), 较零序横差和裂相横差单独作用时分别提高了 263 种和 95 种。

表 5 双横差保护的故障动作情况

Table 5 Fault action of double transverse differential protection

	同相同分支	同相异分支	异相	总计
槽内	90(96)	23(30)	126(126)	239(252)
端部	907(1 146)	144(156)	5 486(5 502)	6 537(6 804)
总计	997(1 242)	167(186)	5 612(5 628)	6 776(7 056)

同相同分支短路故障中有 245 种保护拒动, 分析其匝差情况, 如图 8 所示。其中匝差为 1~2 匝的占比 93.06%, 但由于小匝差的压差较小, 实际发生概率较低。

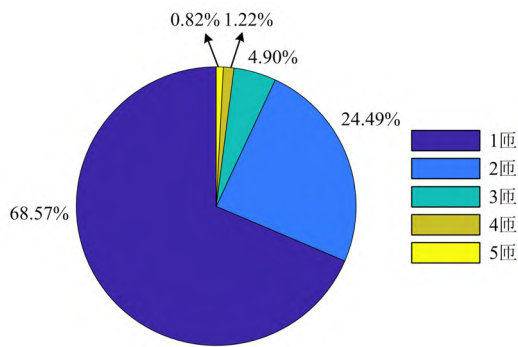


图 8 拒动故障匝差统计

Fig. 8 Statistics of turn difference of rejection fault

纵差保护通常对异相短路故障有极高的灵敏度<sup>[26-29]</sup>。在双横差保护的基础上, 分别增加完全纵差保护和双不完全纵差保护, 称为方案一和方案二, 两种方案的故障动作情况如表 6、表 7 所示。可以发现两种方案的故障可动作数目相同, 总动作率均为 96.26%。可以使双横差保护方案原来不能动作的 16 种异相故障都被覆盖到, 但对匝间短路故障无补偿作用。从保护范围最大化的角度出发, 两种方案的保护效果是相同的。考虑到微机保护装置要求在

采样间隔时间内(0.833 ms)对所有的主保护完成一次计算, 如果主保护配置得过于冗余, 不仅会加大 CPU 计算压力, 也会加大运行和整定的复杂程度。因此, 建议主保护配置方案为方案一, 具体为: “零序横差电流保护+裂相横差电流保护+完全纵差电流保护”。

表 6 方案一: 双横差保护+完全纵差保护的故障动作情况

Table 6 Fault action of double transverse differential protection + complete longitudinal differential protection

	同相同分支	同相异分支	异相	总计
槽内	90(96)	23(30)	126(126)	239(252)
端部	907(1 146)	144(156)	5 502(5 502)	6 553(6 804)
总计	997(1 242)	167(186)	5 628(5 628)	6 792(7 056)

表 7 方案二: 双横差保护+双不完全纵差保护的故障动作情况

Table 7 Fault action of double transverse differential protection+ double incomplete longitudinal differential protection

	同相同分支	同相异分支	异相	总计
槽内	90(96)	23(30)	126(126)	239(252)
端部	907(1 146)	144(156)	5 502(5 502)	6 553(6 804)
总计	997(1 242)	167(186)	5 628(5 628)	6 792(7 056)

### 3.2 开焊断线故障

利用所建立的数学模型对前述机组在额定并网满载工况下的定子绕组开焊故障进行仿真分析。该可变速机组定子绕组共有 12 个分支, 因此, 开焊故障共有 12 种可能。以 b1 分支发生开焊故障为例, 仿真得到机端三相电流瞬时值波形, 如图 9 所示, 机端各分支电流瞬时值如图 10 所示, 零序横差电流有效值变化情况如图 11 所示。

可以发现, 发生开焊断线故障后, 三相电流的幅值变化较小, 开焊分支电流在发生开焊故障后下降为零, 而其他分支电流并没有一种明显的规律性。工程上, 零序横差电流保护对开焊故障较为灵敏, 对该机组可能发生的 a1—c4 的 12 种开焊断线故障全部进行仿真, 并计算零序横差电流的有效值, 计算结果如表 8 所示。

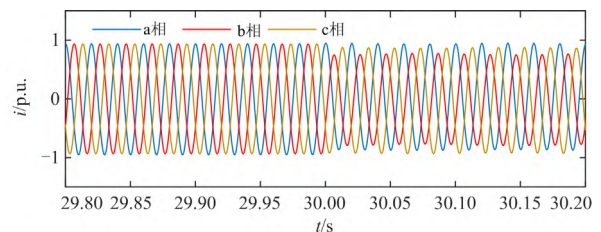


图 9 机端三相电流瞬时值

Fig. 9 Instantaneous value of three phase current of generator

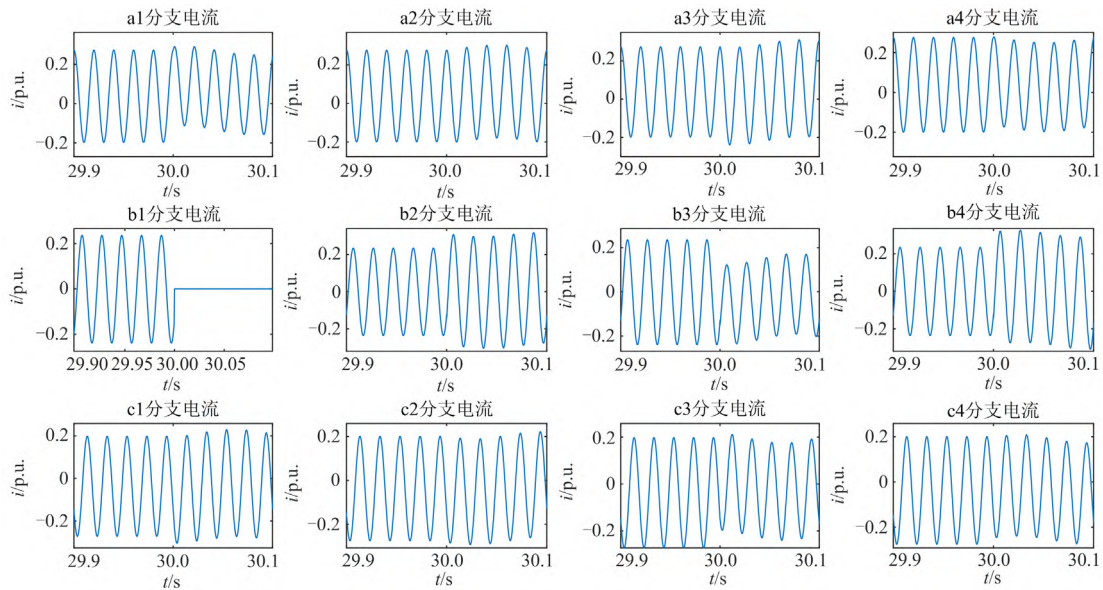


图 10 机端各分支电流瞬时值

Fig. 10 Instantaneous current of each branch of generator

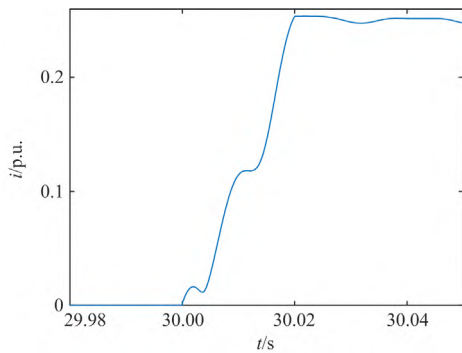


图 11 零序横差电流有效值

Fig. 11 Effective value of zero sequence transverse-differential current

表 8 开焊断线故障时零序横差电流的有效值

Table 8 Effective value of zero-sequence transverse-differential current in case of wire-breaking fault

开焊分支	a1	a2	a3	a4
零序横差电流	0.241 3I <sub>N</sub>	0.245 8I <sub>N</sub>	0.241 6I <sub>N</sub>	0.245 7I <sub>N</sub>
开焊分支	b1	b2	b3	b4
零序横差电流	0.247 5I <sub>N</sub>	0.243 5I <sub>N</sub>	0.247 1I <sub>N</sub>	0.243 4I <sub>N</sub>
开焊分支	c1	c2	c3	c4
零序横差电流	0.245 6I <sub>N</sub>	0.247 2I <sub>N</sub>	0.245 5I <sub>N</sub>	0.247 1I <sub>N</sub>

额定并网满载工况下, 12 种故障零序横差电流的有效值介于 0.241 3I<sub>N</sub> 至 0.247 5I<sub>N</sub>。由于零序横差保护门槛值通常整定为 0.05I<sub>N</sub>(《导则》推荐定值), 所以零序横差保护均能够以极高的灵敏度可靠动作。这也就说明零序横差保护应该作为该机组必配

的保护。假设零序横差电流随负荷电流的增加近似呈线性变化, 且不考虑其他因素对零序横差电流的影响, 则即使零序横差电流最小的 a1 分支发生开焊断线故障, 只要机组所带负荷大于满载的 20.72%, 零序横差电流保护可动作。

由于篇幅限制, 对于其他运行工况下的进一步仿真分析将另撰文研究。

#### 4 结论

(1) 基于定、转子多分支电压及磁链方程, 建立可变速抽水蓄能机组的内部短路故障和开焊断线故障的数学模型。考虑了交流励磁和转子转速可变的特点, 该模型适用于所有可变速抽水蓄能机组的内部故障仿真计算。

(2) 以某台可变速机组为例, 对于内部短路故障, 经量化计算, 建议该变速机组的主保护配置方案为: “零序横差电流保护+裂相横差电流保护+完全纵差电流保护”。故障总动作率可达 96.26%, 拒动故障中小匝差故障(1~2 匝)占比 93.06%。

(3) 对于开焊断线故障, 当机组所带负荷大于满载的 20.72%时, 零序横差电流保护即可动作所有的开焊断线故障。

#### 参考文献

[1] 张占安, 蔡兴国. 考虑可变速抽水蓄能机组运行特性的低碳调度[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(增刊 1): 51-60.  
ZHANG Zhan'an, CAI Xingguo. Low-carbon dispatch



- considering operating characteristics of variable speed pumped storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(S1): 51-60.
- [2] 贾德峰, 王明东, 傅润炜, 等. 抽水蓄能机组 RTDS 仿真与失磁保护改进研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(3): 158-164.  
JIA Defeng, WANG Mingdong, FU Runwei, et al. RTDS simulation and improvement of excitation-loss protection for pumped storage units[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(3): 158-164.
- [3] 贾德峰, 王明东, 傅润炜, 等. 抽水蓄能机组 RTDS 仿真与失磁保护改进研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(3): 158-164.  
JIA Defeng, WANG Mingdong, FU Runwei, et al. RTDS simulation and improvement of excitation-loss protection for pumped storage units[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(3): 158-164.
- [4] 陈煌, 黄汉昌, 黎值源, 等. 抽水蓄能机组孤网运行稳定特性分析[J]. 电测与仪表, 2021, 58(11): 113-120.  
CHEN Huang, HUANG Hanchang, LI Zhiyuan, et al. Analysis on the stability characteristics of isolated network of the pumped storage unit[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(11): 113-120.
- [5] 林俐, 李北晨, 孙勇, 等. 基于高比例新能源消纳的抽水蓄能容量多时间尺度迭代优化配置模型[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(1): 104-111.  
LIN Li, LI Beichen, SUN Yong, et al. Multi-time-scale iterative optimal configuration model of pumped storage capacity based on accommodation of high share new energy[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(1): 104-111.
- [6] YAMASHITA H. Upgrade from the fixed speed to adjustable speed (Okutataragi Pumped storage power plant)[C]// CIGRE, August 21, 2016, Paris, French.
- [7] DENG Yuwen, WANG Pengfei. Dynamic analysis of variable-speed pumped storage plants for mitigating effects of excess wind power generation[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2022, 134: 1-17.
- [8] BIDGOLI M A, YANG Weijia, AHMADIAN A. DFIM versus synchronous machine for variable speed pumped storage hydropower plants: a comparative evaluation of technical performance[J]. Renewable Energy, 2020, 159: 72-86.
- [9] 梁廷婷, 王凯, 陈俊. 变速抽水蓄能机组继电保护方案研究[J]. 水电与抽水蓄能, 2020, 6(5): 62-67.  
LIANG Tingting, WANG Kai, CHEN Jun. Study on relay protection scheme of variable speed pumped-storage unit[J]. Hydropower and Pumped Storage, 2020, 6(5): 62-67.
- [10] SALOMON C P, SANTANA W C, LAMBERT-TORRES G. Discrimination of synchronous machines rotor faults in electrical signature analysis based on symmetrical components[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(3): 3146-3155.
- [11] VALAVI M, JORSTAD K G, NYSVEEN A. Electromagnetic analysis and electrical signature-based detection of rotor inter-turn faults in salient-pole synchronous machine[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2018, 54(9): 90-100.
- [12] LEBAROU A, MEDOUED A. Online computational tools dedicated to the detection of induction machine faults[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2013, 44: 752-757.
- [13] 陈俊, 叶宏. 变速抽水蓄能机组转子绕组内部短路故障保护研究[J]. 中国电力, 2021, 54(12): 121-127, 136.  
CHEN Jun, YE Hong. Research on protection of internal short circuit in rotor winding of variable speed pumped-storage generator-motor[J]. Electric Power, 2021, 54(12): 121-127, 136.
- [14] 牛化敏, 桂林, 孙宇光, 等. 基于多回路理论的交流励磁电机定子绕组内部故障仿真与实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(12): 3666-3684.  
NIU Huamin, GUI Lin, SUN Yuguang, et al. Simulation and experimental research on stator winding internal faults of AC excitation machine based on multi-loop theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(12): 3666-3684.
- [15] 魏书荣, 张路, 符杨, 等. 基于派克矢量轨迹椭圆度的海上双馈电机定子绕组匝间短路早期故障辨识[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(10): 3001-3009.  
WEI Shurong, ZHANG Lu, FU Yang, et al. Early fault detection based on the Park's vector locus ovality for inter-turn faults in stator windings of the offshore wind DFIG[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(10): 3001-3009.
- [16] 李俊卿, 李忠徽. 基于支持向量机和 D-S 证据理论的双馈风机定子匝间短路故障诊断[J]. 电机与控制应用, 2018, 45(5): 99-103.  
LI Junqing, LI Zhonghui. Fault diagnosis of stator inter-turn short-circuit in DFIG based on support vector machine & D-S evidence theory[J]. Electric Machines & Control Application, 2018, 45(5): 99-103.
- [17] 魏书荣, 李正茂, 符杨. 计及电流估计差的海上双馈电机定子绕组匝间短路故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(13): 3969-3977.

WEI Shurong, LI Zhengmao, FU Yang. Inter-turn faults diagnosis on stator windings of offshore wind DFIGs considering current estimated difference[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(13): 3969-3977.

[18] 桂林, 刘正国, 孙宇光. 大型抽水蓄能机组主保护优化设计研究[J]. 水电与抽水蓄能, 2019, 5(5): 63-66.

GUI Lin, LIU Zhengguo, SUN Yuguang. Optimum design of main protection for large pumped storage units[J]. Hydropower and Pumped Storage, 2019, 5(5): 63-66.

[19] 高景德, 王祥珩, 李发海. 交流电机及其系统的分析[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2005.

[20] 夏勇军, 尹项根, 陈德树. 大型水轮发电机内部故障暂态仿真模型简化及仿真验证[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(12): 70-74.

XIA Yongjun, YIN Xianggen, CHEN Deshu. Simplification and validation of transient simulation model of large hydraulic generator internal short circuit faults[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(12): 70-74.

[21] 毛俊喜, 张哲, 尹项根. 水轮发电机定子短路故障形式分析及其算法设计[J]. 电网技术, 2007, 31(2): 75-80.

MAO Junxi, ZHANG Zhe, YIN Xianggen. Short-circuit fault modality analysis of hydraulic generator stators and design of corresponding algorithm[J]. Power System Technology, 2007, 31(2): 75-80.

[22] 桂林, 王祥珩, 孙宇光. 叠绕组水轮发电机内部故障特点与主保护性能分析[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(7): 70-74.

GUI Lin, WANG Xiangheng, SUN Yuguang. Study on internal fault feature and main protection performance of lap winding hydraulic generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(7): 70-74.

[23] 夏勇军, 尹项根, 张哲. 瀑布沟电站 600 MW 大型水轮发电机主保护优化设计[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(14): 92-96.

XIA Yongjun, YIN Xianggen, ZHANG Zhe. Optimized main protection scheme design of 600 MW huge hydraulic generator in Pubugou power station[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(14): 92-96.

[24] 桂林, 陈俊, 姜树德. 交流励磁发电电动机内部故障分析及主保护设计新进展[J]. 水电与抽水蓄能, 2021, 7(4): 26-33.

GUI Lin, CHEN Jun, JIANG Deshu. New development of internal fault analysis and main protection design of AC excited generator-motor[J]. Hydropower and Pumped Storage, 2021, 7(4): 26-33.

[25] 桂林, 陈俊, 王凯. 基于柔性光学 TA 的发电电动机主保护优化设计[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(18): 132-140.

GUI Lin, CHEN Jun, WANG Kai. Optimal design of main protection for generator-motor based on flexible optical current transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(18): 132-140.

[26] 李志坚, 吴崇昊, 万洛飞. 大型同步调相机的启机过程分析与启机保护实现[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(20): 148-154.

LI Zhijian, WU Chonghao, WAN Luofei. Analysis of start-up process and implementation of start-up protection of a large synchronous condenser[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(20): 148-154.

[27] 胡嘉武. 清江水布垭电站发电机定子绕组主保护分析[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(20): 104-109.

HU Jiawu. Analyzing stator windings main protection of generator for Qingjiang Shuibuya hydropower station[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(20): 104-109.

[28] 尹项根, 王义凯, 谭力铭. 故障机理深度关联的大型发电机保护新原理探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(22): 1-7.

YIN Xianggen, WANG Yikai, TAN Liming. Discussion on a new principle of large generator protection deeply associated with fault mechanisms[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(22): 1-7.

[29] GUO Leilei, XU Zhiye, JIN Nan. A weighted voltage model predictive control method for a virtual synchronous generator with enhanced parameter robustness[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(4): 482-492.

收稿日期: 2021-10-10; 修回日期: 2021-12-25

作者简介:

尹项根(1954—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统继电保护与安全自动控制; E-mail: xgyin@hust.edu.cn

乔健(1997—), 男, 通信作者, 博士研究生, 研究方向为电力系统继电保护. E-mail: 906982507@qq.com

(编辑 许威)