

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.236154

# 基于重复脉冲法的变速抽蓄机组转子绕组短路故障诊断方法

卢庆辉<sup>1</sup>, 尹项根<sup>1</sup>, 乔健<sup>1</sup>, 尹昕<sup>2</sup>, 贺儒飞<sup>3</sup>, 马一鸣<sup>3</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. 武汉理工大学自动化学院, 湖北 武汉 430070; 3. 南方电网调峰调频发电有限公司储能研究院, 广东 广州 510950)

**摘要:** 变速抽蓄机组的转子侧采用特殊的三相交流绕组结构, 导致其转子绕组短路故障诊断困难。为此, 提出了一种基于重复脉冲法(repetitive surge oscillograph, RSO)的离线故障诊断方法。首先设计了重复脉冲法在变速抽蓄机组中的应用方案, 通过在转子三相同步注入低压脉冲并检测响应曲线来判断机组故障情况。基于不同短路故障的响应特性分析, 提出了转子绕组短路故障类型和故障相别的识别方法。然后, 结合变分模态分解与 Teager 能量算子(variational mode decomposition-teager energy operator, VMD-TEO)估计注入脉冲和特征曲线的起始突变位置, 并通过时间差值和实测波速确定故障位置。最后, 利用指数还原故障因子衡量匝间短路故障的严重程度, 以解决克服行波衰减引起的特征波形幅值重叠问题。仿真结果表明, 所提方案能准确诊断变速抽蓄机组的各种转子绕组短路故障。  
**关键词:** 变速抽蓄机组; 转子绕组短路故障; 重复脉冲法; VMD-TEO

## Diagnosis method for rotor winding short-circuit fault of a variable speed pumped storage unit based on a repetitive surge oscillograph

LU Qinghui<sup>1</sup>, YIN Xianggen<sup>1</sup>, QIAO Jian<sup>1</sup>, YIN Xin<sup>2</sup>, HE Rufe<sup>3</sup>, MA Yiming<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. School of Automation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 3. CSG PGC Power Storage Research Institute, Guangzhou 510950, China)

**Abstract:** The rotor side of a variable speed pumped storage unit adopts a special three-phase AC winding structure, and this makes it difficult to diagnose a short-circuit fault in the rotor winding. Therefore, this paper proposes an offline diagnosis method based on the principle of the repetitive surge oscillograph (RSO). First, the application scheme of the RSO method in the VSPSU is designed. Low-voltage pulses are injected into three phases of the rotor simultaneously and the response curve is detected to determine the fault condition of the unit. Then based on the analysis of the response characteristics of different short-circuit faults, an identification method for rotor winding short-circuit fault types and faulty phases is proposed. Subsequently, the variational mode decomposition-Teager energy operator (VMD-TEO) method is used to estimate the injected pulse and characteristic curve's initial sudden change position and then the fault position is determined by the time difference and the measured wave velocity. Finally, an exponential recovery fault factor is proposed to measure the severity of inter-turn short circuit faults to overcome the problem of amplitude overlap of characteristic waveforms caused by traveling wave attenuation. The simulation results show that the scheme proposed in this paper can accurately diagnose various rotor winding short circuit faults of a variable speed pumped storage unit.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52007010).

**Key words:** variable-speed pump-storage unit; short-circuit fault of rotor winding; repetitive pulse method; VMD-TEO

## 0 引言

随着大规模风电等可再生能源并网, 电力系统

亟需抽水蓄能电站发挥削峰填谷、调频调相等快速响应的作用以保证电网的安全可靠运行<sup>[1-4]</sup>。相比传统的定速抽蓄机组, 基于可变速双馈感应电机的变速抽蓄机组具有更高的机组运行范围和运行效率, 并可以有效抑制系统低频振荡, 维持电网稳定<sup>[5-8]</sup>。变速抽水蓄能技术可以为电力系统的去碳化提供更

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52007010); 中国南方电网有限责任公司科技项目资助(STKJXM20210102)

好的支撑, 建造可变速抽水蓄能电站已成为一种新的趋势。

定速抽蓄机组采用直流励磁的同步电机, 转子绕组短路故障形式为匝间短路, 而变速抽蓄机组采用三相交流励磁的双馈感应电机, 转子绕组发生短路故障的形式和故障特性更加复杂<sup>[9-10]</sup>。虽然两种机组的励磁结构不同, 但转子绕组短路都会反映短路点过热、绕组温度升高、转子励磁电流增加、气隙磁通不平衡引发机组异常振动等现象, 甚至发生烧毁转子绕组及本体的事故。转子绕组短路故障频发, 对机组本身的安全构成很大威胁。因此, 准确诊断短路故障、加快故障检修速度为变速抽蓄机组的安全稳定运行提供保障具有重大意义。

变速抽蓄机组本质上是一种双馈感应电机, 但又和传统双馈感应电机有所区别, 其转子绕组采用多分支结构。在双馈电机转子绕组故障检测方面, 文献[11]分析了双馈感应电机转子绕组发生匝间短路时定子侧的电流谐波成分, 并以此构造转子绕组匝间短路故障检测判据。文献[12]针对文献[7]低转差下故障特征分量被淹没的情况, 提出了基于定子平均瞬时功率频谱特性的故障检测方法。文献[13]提出了一种以故障前后磁链观测差为特征量的故障辨识方法。此外, 文献[14]提出了一种基于 FFT-LSTM 的变速抽蓄机组转子绕组短路故障和偏心故障诊断方法, 但该方法主要是用来区分利用定子特征谐波环流检测出的故障是转子绕组短路故障还是偏心故障。以上方法均是通过检测转子短路故障所反映在定子侧的电气量, 主要立足于转子绕组短路故障的检测, 不能满足变速抽蓄机组的诊断需求, 即无法辨识短路故障类型、确定故障位置以及提供准确的故障程度判断。近年来, 重复脉冲法<sup>[15-17]</sup>(recurrent surge oscillography, RSO)在汽轮发电机转子绕组匝间短路故障诊断方面被广泛应用, 其本质是一种直接在转子侧注入行波的离线诊断方法。此外也有学者将该方法扩展到变压器绕组的匝间短路故障诊断以及风机叶片引下线断裂故障诊断<sup>[18-19]</sup>。但上述应用场景简单, 现有的重复脉冲法不能直接用于具有复杂转子绕组结构的变速抽蓄机组, 但可为变速抽蓄机组转子绕组短路故障诊断提供新的思路。

在故障定位方面, 文献[20]结合遗传神经网络建立故障特征与故障位置的映射关系, 实现匝间短路故障定位, 但该方法复杂度较高、不易工程实现。文献[21]提出了一种利用多信号分类算法估计注入脉冲与特征波形的时间差进行定位的方法。变分模态分解能有效解决模态分量混叠的问题, 具有较强的抗噪声干扰能力, 其在输电线路故障定位方面得

到了一定应用<sup>[22-24]</sup>, 但该算法在转子绕组短路故障定位方面还未曾得到研究。

本文受重复脉冲法在多场景下的应用启发, 将该方法引入到变速抽蓄机组转子短路故障的诊断当中。本文主要分为 4 个部分, 第 1 部分介绍了重复脉冲法在变速抽蓄机组中应用的原理, 提出脉冲检测策略。第 2 部分基于转子绕组在不同短路故障下的脉冲响应特性, 提出了转子绕组短路故障类型及故障相识别方案。第 3 部分结合变分模态分解与 Teager 能量算子(variational mode decomposition-teager energy operator, VMD-TEO)法和响应特性曲线对故障点进行测距仿真, 研究了不同故障类型、故障位置及短路电阻对测距准确性的影响。第 4 部分研究了转子绕组匝间短路故障严重程度的判断方法, 提出以指数还原故障因子衡量故障严重程度的方法。结合在 PSCAD/EMTDC 中搭建的转子绕组故障仿真模型及数值计算软件证实了本文所提方法的准确性。

## 1 变速抽蓄机组转子短路故障诊断原理

本文对传统的重复脉冲法进行改进, 使它适用于变速抽蓄机组的转子短路故障检测。根据某抽水蓄能电站实际应用的变速抽蓄机组, 建立其转子绕组故障模型。该变速抽蓄机组的转子绕组共有三相, 每相并联两分支, 每分支串联 49 个线圈, 每个线圈长度为 10.5 m, 更详细的参数见附录 A 表 A1。

RSO 是一种离线检测方法, 如图 1 所示, 需要在变速抽蓄机组停机后, 通过转子绕组机端侧的三相集电环由脉冲发生器同时向转子绕组的三相注入相同的低压脉冲信号, 并同时在各相端部设置信号采集点。根据行波理论, 当脉冲信号通过阻抗不连续的短路点时会发生信号的折反射现象, 结合 RSO 的特点, 本方案对三路响应波形两两求差得到 3 个特征曲线, 进而通过 3 个特征曲线来进行故障诊断。

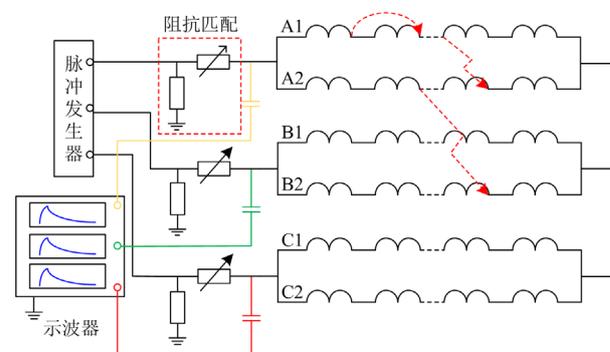


图 1 变速抽水蓄能机组 RSO 诊断示意图

Fig. 1 Schematic diagram of RSO diagnosis for variable speed pumped storage unit

此外,为抑制行波在转子绕组末端发生反射,从而干扰故障信号特征,需要调节滑动变阻器以达到阻抗匹配效果。

RSO 要求注入信号一般都有陡峭的上升沿,频率可达兆赫兹级,需要建立转子绕组的分布参数模型<sup>[15]</sup>。本文采用 PSCAD/EMTDC 软件进行仿真,采用频率相关的相域线路模型来模拟转子绕组,并采用 Heidler 函数模型来生成脉冲信号,通过调整波头时间常数  $\tau_1$  和波尾时间常数  $\tau_2$  实现不同陡度波形的产生,仿真及采样步长为  $0.01 \mu\text{s}$ 。

## 2 基于响应特性的转子绕组短路故障识别

### 2.1 无故障下的响应特性

设转子绕组单相单分支的波阻抗为  $Z$ ,则由两分支并联形成的一相绕组波阻抗为  $Z/2$ 。当由集电环传来的某一相脉冲信号到达中性点时将面临三相绕组的分岔点,即波阻抗发生变化。

根据彼得逊法则可知,此时折射波和反射波与前行波的关系如式(1)和式(2)所示。

$$u_{2f} = \frac{2u_{1f}}{\frac{Z}{2} + \frac{Z}{2} // \frac{Z}{2}} \times \left( \frac{Z}{2} // \frac{Z}{2} \right) = \frac{2}{3}u_{1f} \quad (1)$$

$$u_{1b} = u_{2f} - u_{1f} = -\frac{1}{3}u_{1f} \quad (2)$$

式中:  $u_{1f}$  为入射波电压;  $u_{2f}$  为折射波电压;  $u_{1b}$  为反射波电压。上述公式仅反映一相注入信号的情况,当从三相同时注入相同的低压脉冲信号,由于转子绕组的对称性,将会有三相注入脉冲同时到达中性点并发生折反射。对任意一相来说,下一时刻将有另外两相注入脉冲的折射波和本相注入脉冲的反射波同时返回到该相信号采集点,其值如式(3)所示。

$$u_{\Sigma} = 2u_{2f} + u_{1b} = u_{1f} \quad (3)$$

分析可知,该种情况相当于各相注入信号在中性点发生了全反射。图2所示为无故障情况下的三相检测波形。由图2可知,三相检测波形(即三相脉冲响应波形)完全重叠,且都有一个叠加到原始信号的反射波,因此在无故障情况下3个响应特性曲线(由三相脉冲响应波形两两求差得到)均为一条为0的直线。同时经过反射波叠加后的信号最高幅值并没有超过原始注入信号,这是因为在行波的传播过程中存在着传导损耗,该损耗既会使行波幅值下降,也会拉平波头,降低行波的陡度。

### 2.2 短路故障下的响应特性

基于变速抽蓄机组的转子绕组结构,其转子绕组故障共有同相同分支匝间短路、同相异分支匝间短路、相间短路3种类型。

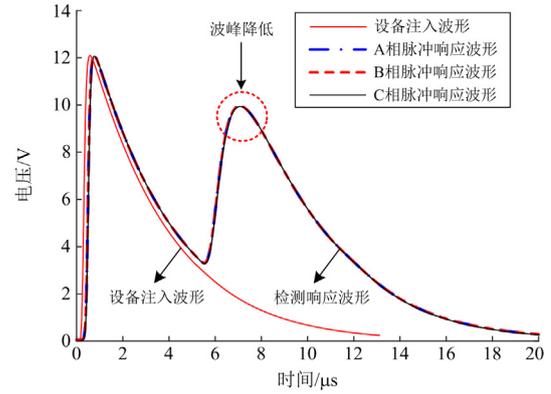


图2 无故障情况下三相检测波形

Fig. 2 Three-phase detection waveform under no-fault condition

#### 2.2.1 同相同分支匝间短路

在转子绕组发生同相同分支匝间短路时,故障相注入脉冲在故障点发生的折反射时间要远早于非故障相注入脉冲到达故障点的时间,因此可把非故障相的脉冲波形当作参考波形,单独分析故障相注入脉冲在故障点产生的折反射现象。匝间短路点可以看成是一个具有集总参数的电阻  $R$  (短路故障电阻),其两侧分别并联两条具有相同波阻抗  $Z$  的线路。根据彼得逊法则可以得到图3所示的集中参数等值电路,并得到折射波电压  $u_{21f}$ 、 $u_{22f}$  和  $u_{1b}$  与前行波  $u_{1f}$  的关系,如式(4)~式(6)所示。

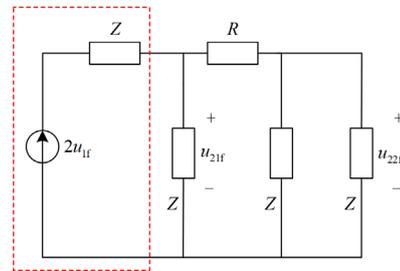


图3 同相同分支匝间短路集中参数等值电路

Fig. 3 Concentrated parameter equivalent circuit when short circuit between turns with the same branch in the same phase

$$u_{21f} = \frac{2u_{1f}}{Z + Z // \left( R + \frac{Z}{2} \right)} \times Z // \left( R + \frac{Z}{2} \right) = \frac{2R + Z}{2R + 2Z}u_{1f} \quad (4)$$

$$u_{22f} = \frac{Z}{2R + Z}u_{21f} = \frac{Z}{2R + 2Z}u_{1f} \quad (5)$$

$$u_{1b} = u_{21f} - u_{1f} = -\frac{Z}{2R + 2Z}u_{1f} \quad (6)$$

根据式(4)~式(6),与无短路电阻时相比,短路电阻的存在会减小行波的幅值,即存在能量损耗。考虑到现实情况中短路故障电阻  $R$  往往要小于转

子绕组波阻抗  $Z$ , 这在相间短路的情况下更为明显, 因此可得到  $u_{2f} \approx \frac{1}{2u_{1f}}$ 、 $u_{1b} \approx -\frac{1}{2u_{1f}}$ 。下面以这种近似为基础来分析同相同分支匝间短路时波的折反射过程, 如图 4 所示。

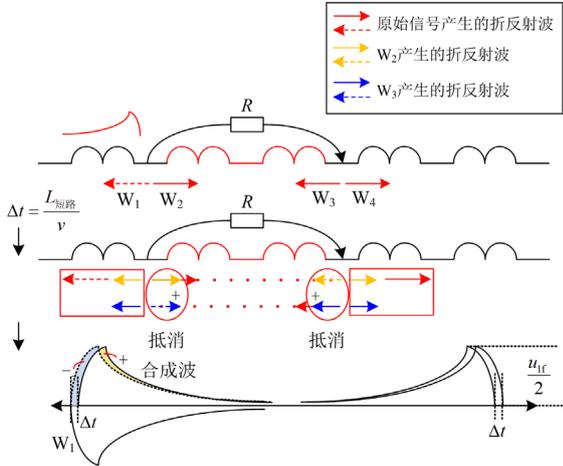


图 4 同相同分支匝间短路时波的折反射分析图

Fig. 4 Analysis of refraction and reflection of waves during short circuit between turns of same branch in the same phase

以 A 相为例, 当 A 相注入脉冲到达短路点时会发生折反射, 产生反射波  $W_1$  及折射波  $W_2$ 、 $W_3$  和  $W_4$ 。反射波幅值为入射脉冲的 1/2 且为负极性, 而折射波幅值也为入射波的 1/2 但为正极性。经过  $\Delta t$  (波在被短路绕组上的传播时间) 后,  $W_2$ 、 $W_3$  到达短路点再次发生式(4)一式(6)所示的折反射。此时被短路绕组两端向心方向都会产生一个正极性的折射波和一个负极性的反射波, 由于折射波和反射波幅值相等, 因此相互抵消。同时由于  $W_2$ 、 $W_3$  的折射, 指向绕组首端方向和中性点方向会同时产生两个幅值为 1/4 注入脉冲的折射波。

原始脉冲产生的反射波为负极性, 同时紧随该反射波后的为  $W_2$ 、 $W_3$  的折射波, 其合成波幅值与反射波  $W_1$  大小相等, 极性相反, 时间滞后  $\Delta t$ , 根据图 4 可知两波形的错位会先后造成原始脉冲的削减和增加, 但由于两波形错位造成的增面积较小, 因此图 5(a)中的 A 处主要为一凹谷。当短路电阻增大时, 错位造成的增加效应将会变大, 将会在凹谷后伴随一个凸峰的产生。

当 B 相和 C 相的注入脉冲到达短路点时也会发生同样的折反射, 因此反射波会削弱 B 相和 C 相的脉冲, 以 B 相和 C 相注入脉冲为参考, 此时 A 相将表现为一凸峰(图 5(a)中 B 处)。基于不同的参考波形, 特征波形  $u_{AB}$ 、 $u_{BC}$  和  $u_{CA}$  分别如图 5(b)一图 5(d)所示, 由于 B 相和 C 相的脉冲波形一致, 因此

特征波形  $u_{BC}$  为一幅值接近 0 的直线,  $u_{AB}$  和  $u_{CA}$  则表现为凹谷和凸峰的出现。

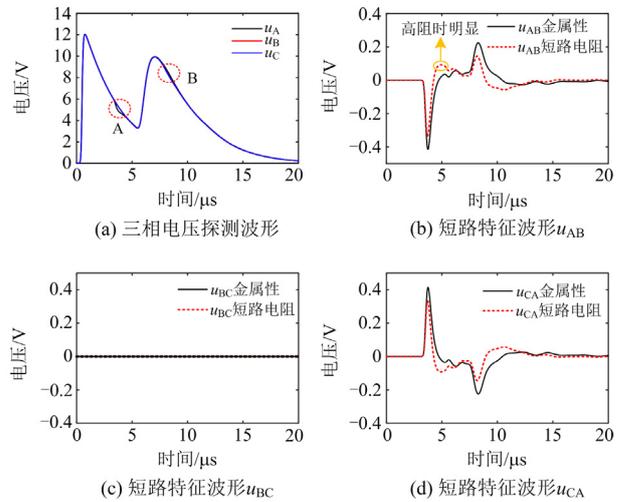


图 5 同相同分支匝间短路时的检测波形图

Fig. 5 Detection waveforms during short circuit between turns of same branch in the same phase

### 2.2.2 同相异分支匝间短路

在转子绕组发生同相异分支匝间短路时, 首端距故障点较近分支的注入脉冲首先到达短路点并发生折反射, 即图 6 中注入脉冲  $W$  首先在故障点产生反射波  $W_1$  及折射波  $W_2$ 、 $W_3$  和  $W_4$ , 折射波和反射波与前行波的关系与前述同相同分支匝间短路相同。当经过  $\Delta t$  (波在两分支短路点相差距离上的传播时间) 后, 另一分支的注入脉冲也到达短路点并发生

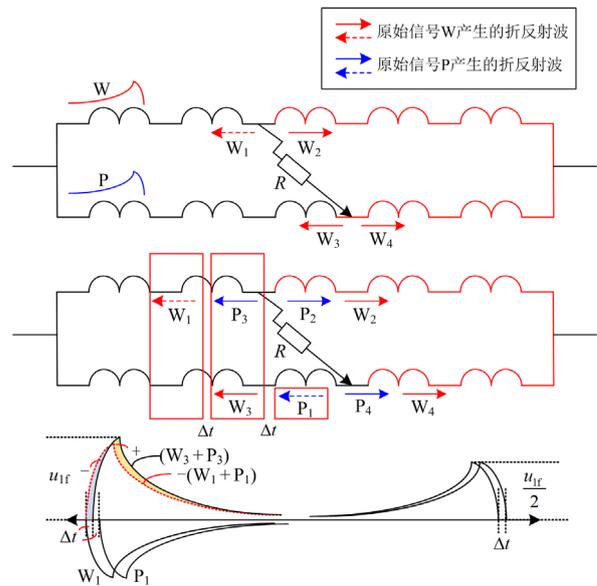


图 6 同相异分支匝间短路时波的折反射分析图

Fig. 6 Analysis of refraction and reflection of waves during short circuit between turns of different branches in the same phase

折反射，此时注入脉冲  $P$  在故障点产生反射波  $P_1$  及折射波  $P_2$ 、 $P_3$  和  $P_4$ 。

考虑到波的产生时间及空间距离，负极性的  $W_1$  将首先被检测到，滞后  $\Delta t$  后，正极性的  $P_3$  和  $W_3$  将同时到达探测点，再经过  $\Delta t$  后，负极性的  $P_1$  也将到达首端。把相同极性的信号相加，即可把初始阶段的特征波形看成  $(W_1 + P_1)$  和  $(W_3 + P_3)$  对原始信号的削减和增加所致。和同相分支短路不同的是， $W_1$  和  $P_1$  在时间上错位  $2\Delta t$ ，即  $(W_1 + P_1)$  和  $(W_3 + P_3)$  波形并不完全一致，这也造成两合成波形的错位对原始脉冲的削减和增加效应都很大，表现在图 7(a) 中即凹谷和凸峰的相继明显出现。

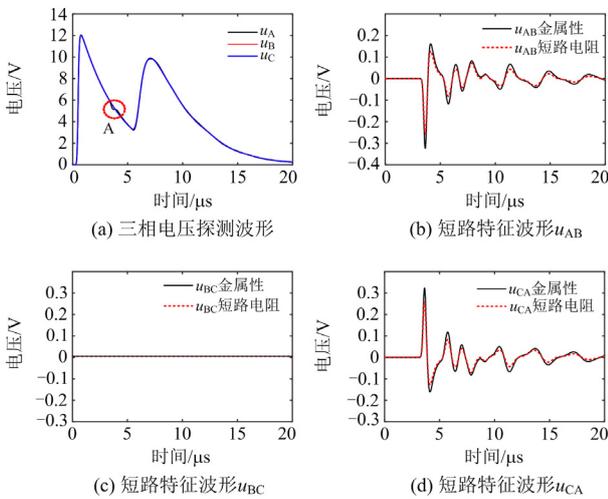


图 7 同相异分支匝间短路时的检测波形图

Fig. 7 Detection waveforms during short circuit between turns of different branches in the same phase

此外，被短路绕组相当于图 6 中的红色绕组部分，行波在该部分绕组的传播时间长，不会在初始阶段完成折反射。由于中性点处波阻抗的变化，折射波又会在此产生折反射，并不会单次到达故障点对端后完全进行抵消，因此会产生一系列的折反射过程。对于其他两相的注入脉冲到达短路点后产生的折反射现象相同，但其波现象会被一系列的折反射过程所湮没。特征波形  $u_{AB}$ 、 $u_{BC}$  和  $u_{CA}$  如图 7(b) — 图 7(d) 所示，可知短路电阻的存在只会减小特征波形的幅值，并不会对波形形状产生影响。

### 2.2.3 相间短路

相间短路时，波的折反射过程和同相异分支匝间短路情况下相同。但由于短路点跨越两相，原始注入脉冲在短路点产生的折反射波将会分两路返回两相探测点。以 A 相和 B 相发生相间短路为例，如图 8 所示，如果短路点距离 A 相较近，A 相注入脉冲首先到达短路点发生折反射，A 相首端方向产生

一个负极性的反射波  $W_1$ ，B 相首端方向产生一个正极性的折射波  $W_3$ 。随后 B 相注入脉冲在短路点发生的折反射会在 A 相首端方向产生一个正极性的折射波  $P_3$ ，B 相首端方向产生一个负极性的反射波  $P_1$ 。因此对于 A 相来说，原始信号会先削减后增加，对 B 相来说，原始信号会先增加后削减。和同相分支匝间短路一样，初次折反射后也会有一系列的折反射过程产生。由于会有两相探测点接收到折反射波，特征波形  $u_{AB}$ 、 $u_{BC}$  和  $u_{CA}$  都将会产生明显变化，如图 9(b) — 图 9(d) 所示。分析可知，两故障相探测波形做差得到的特征波形幅值约为其他两个探测波形的两倍。

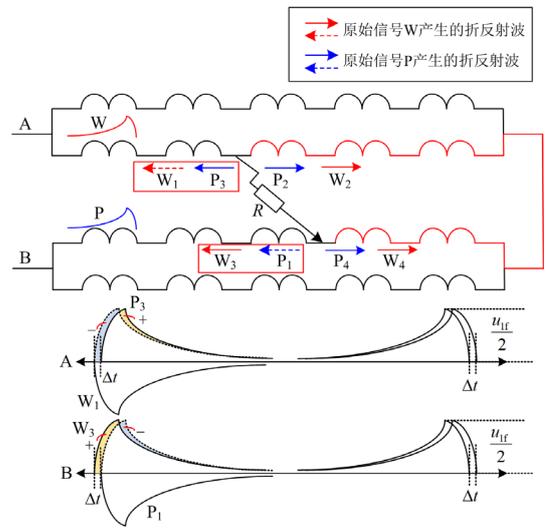


图 8 相间短路时波的折反射分析图

Fig. 8 Refraction and reflection analysis diagram of wave during phase-to-phase short circuit

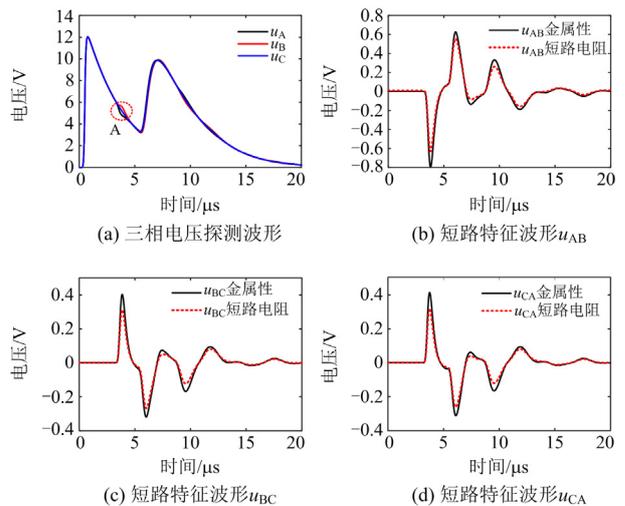


图 9 相间短路时的检测波形图

Fig. 9 Detection waveforms during phase-to-phase short circuit

### 2.3 故障类型识别

将采样数据导入数值计算软件中, 经过作差得到 3 个特征曲线  $u_{AB}$ 、 $u_{BC}$  和  $u_{CA}$ 。根据前述分析, 本文提出的变速抽蓄机组转子短路故障类型识别方法流程如图 10 所示, 图中  $T$  和  $t_0$  分别为行波在两分支长度上的传播时间和注入脉冲时刻。

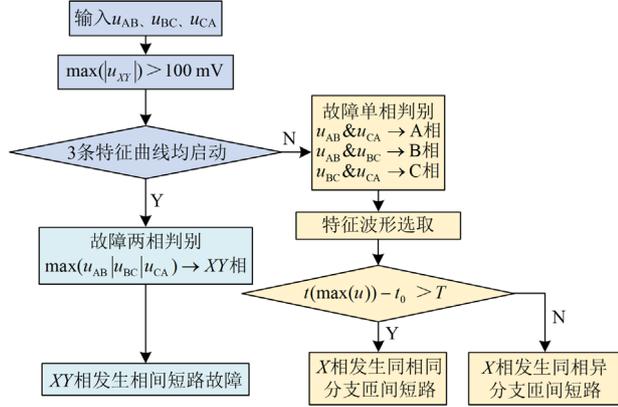


图 10 变速抽蓄机组转子短路故障类型识别方法流程

Fig. 10 Types identification flow of rotor winding short circuit fault of variable speed pumped storage unit

1) 首先分别判断 3 个特征曲线的最大绝对值是否大于整定值(100 mV), 若大于整定值则启动该特征曲线进行判断。

2) 若 3 个特征曲线均启动则可判断出故障类型为相间短路, 进一步根据两故障相探测波形作差得到的特征波形幅值约为其他两个特征波形幅值两倍的特点, 找到 3 个特征波形幅值最大者, 其对应的两相为故障相。

3) 若仅有两条特征曲线启动, 则故障为同相同分支匝间短路或同相异分支匝间短路。此时故障在一相发生, 另外两相作为参考相, 因此同时启动的两个特征曲线所共同拥有的相别即故障相。

4) 如图 5(b)和图 5(d)所示, 两个启动的特征曲线正负关系正好相反, 只选取故障相作为被减相所构成的特征波形(对应于 A、B、C 相, 分别选取特征曲线  $u_{AB}$ 、 $u_{BC}$  和  $u_{CA}$ )进行下一步的识别处理。

5) 采用最大峰值时差检测法对发生的两种匝间故障类型进行识别。其原理如下所述。

结合 2.2.1 节可知, 同相同分支匝间短路故障特征波形最大峰值的出现是由非故障相注入脉冲在故障点产生的负极性反射波对非故障相(参考相)原始波形的削减所致, 其传播路径要大于两分支长度。由 2.2.2 节可知, 同相异分支匝间短路故障特征波形最大峰值的出现是由故障相注入脉冲在短路点产生的正极性折射波对故障相原始波形的增加所致, 其

传播路径要小于两分支长度。传播路径如图 11 所示。

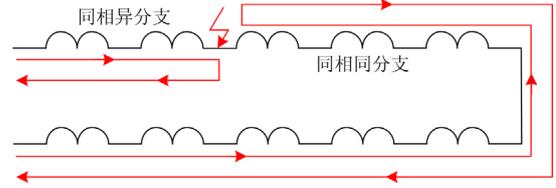


图 11 最大峰值产生时间分析

Fig.11 Maximum peak generation time analysis

根据上述故障特点提出最大峰值时差检测法对同相两种故障类型进行识别。即

$$\begin{cases} t(\max(u)) - t_0 > T, & \text{同相同分支匝间短路故障} \\ t(\max(u)) - t_0 < T, & \text{同相异分支匝间短路故障} \end{cases} \quad (7)$$

表 1 为最大峰值时差检测法对两种匝间故障类型的识别结果。需要注意的是, 当故障点过于靠近中性点时, 最大峰值时差与两分支传播时间无显著差异, 可能会造成误判。由表 1 可知, 当故障位置距首端 450 m 时, 两分支传播时间为 5.03  $\mu\text{s}$ , 同相异分支匝间短路最大峰值时差为 4.89  $\mu\text{s}$ , 基本达到识别的最大长度, 因此该方法可覆盖转子绕组约 90%长度的范围, 具有较高的可靠性。

表 1 两种匝间故障类型识别

Table 1 Identification of two in-phase fault types

故障类型	故障点距首端距离/m	过渡电阻/ $\Omega$	两分支传播时间 $T/\mu\text{s}$	最大峰值时差/ $\mu\text{s}$	识别正确
同相 同分支 匝间 短路	150	0	5.03	9.67	是
	150	25	5.03	9.52	是
	150	50	5.03	9.40	是
	300	0	5.03	7.90	是
	300	25	5.03	7.83	是
	300	50	5.03	7.78	是
	450	0	5.03	6.30	是
	450	25	5.03	6.23	是
	450	50	5.03	6.17	是
同相 异分支 匝间 短路	150	0	5.03	2.13	是
	150	25	5.03	2.13	是
	150	50	5.03	2.13	是
	300	0	5.03	3.85	是
	300	25	5.03	3.85	是
	300	50	5.03	3.85	是
	450	0	5.03	4.89	是
	450	25	5.03	4.89	是
	450	50	5.03	4.89	是

## 3 故障定位

### 3.1 VMD-TEO 脉冲检测算法

故障定位是识别出故障类型后一个很重要的工作, 精准的故障定位有助于帮助现场工作人员快速

找到故障位置, 并采取相应处理措施<sup>[25]</sup>。本文采用 VMD-TEO 方法来准确探测故障发生时刻。

VMD 是一种非递归信号处理方法, 通过迭代搜寻变分模态的最优解, 可将时间序列数据分解为一系列具有有限带宽的本征模态函数(intrinsic mode function, IMF), 从而能够自适应地实现信号的频域剖分及各分量的有效分离, 突出信号的局部特征<sup>[26-27]</sup>。

TEO 是一种非线性算子, 能够有效提取信号能量, 反映信号的瞬时变化<sup>[28-29]</sup>。对于连续信号  $x(t)$ , 其 TEO 定义为

$$\psi[x(t)] = x'^2(t) - x(t)x''(t) \quad (8)$$

式中,  $x'(t)$  和  $x''(t)$  分别为信号  $x(t)$  的一阶和二阶导数。

对于离散信号  $x(n)$ , 其 TEO 定义为

$$\psi[x(n)] = x(n)^2 - x(n-1)x(n+1) \quad (9)$$

式中,  $x(n-1)$  和  $x(n+1)$  分别为信号  $x(n)$  的前、后序列值。

由于 Teager 能量算子是对曲线相邻的 3 个采样点计算, 因此具有很高的时间分辨率, 且实现过程简单, 适用于信号的快速处理。

VMD-TEO 故障定位主要步骤如下: (1) 采集首端探测点故障行波信号或特征信号; (2) 对信号进行 VMD 分解, 得到  $K$  个 IMF 分量(模态); (3) 选取 IMF 分量中的高频模态分量进行 TEO 分析, 得到 Teager 瞬时能量谱; (4) 瞬时能量谱的第一个突变极值点对应的时刻即行波到达时刻。

### 3.2 故障点定位

要获取精确的故障定位效果, 首先要得到准确的行波传播速度。本文所述故障定位方案首先要进行行波速度测试, 即仅在一相注入脉冲信号, 在其他两相中的任何一相接收脉冲信号, 注入信号和接收信号时间之差即行波在转子绕组两分支长度上的传播时间, 得到的行波波速为

$$v = \frac{2 \times L}{t_1 - t_0} \quad (10)$$

式中:  $L$  为单分支绕组长度;  $t_1$  为其他两相接收脉冲定位时刻。以 A 相注入脉冲、B 相接收为例, 对 A 相和 B 相脉冲信号进行 VMD 分解, 取模态数  $K=4$ , 惩罚因子  $\alpha=2000$ , 得到的第一模态分量如图 12(b)所示, 对第一模态分量计算 Teager 能量后得到图 12(c)和图 12(d)。

根据图 12,  $u_A$  和  $u_B$  的 Teager 能量的第一个极大值分别位于  $0.28 \mu\text{s}$  和  $5.31 \mu\text{s}$ 。转子绕组单分支长度为  $514.5 \text{ m}$ , 由式(10)得到的波速为  $204.573 \text{ m}/\mu\text{s}$ 。对于不同的转子绕组短路故障, 根据相应的特征波

形, 再利用 VMD-TEO 法提取对应的故障时刻, 进一步得到注入波形和特征波形的时间差  $\Delta t_{\text{VMD-TEO}}$ 。该时间差为行波在首端和故障点之间往返的时间, 因此得到的故障点距首端距离为

$$l = \frac{1}{2} v \times \Delta t_{\text{VMD-TEO}} \quad (11)$$

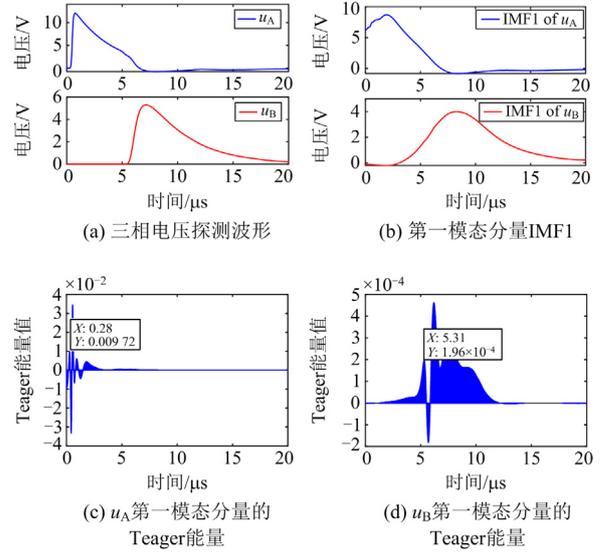
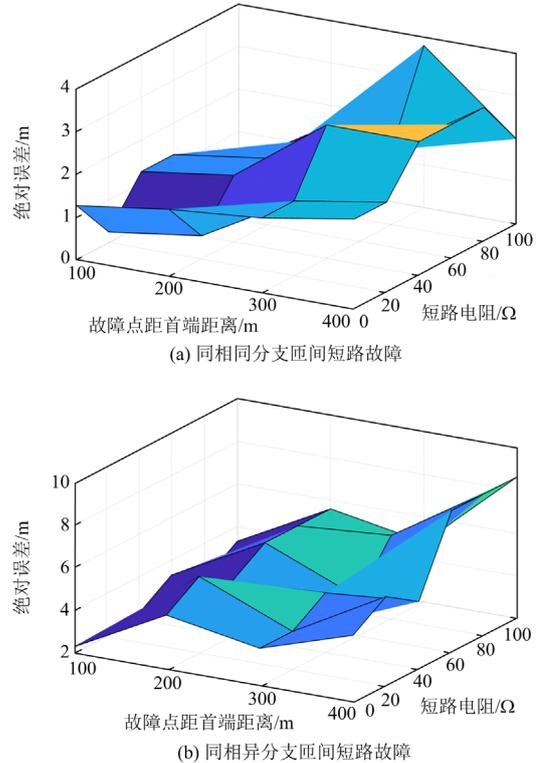


图 12 VMD-TEO 法故障定位分析图

Fig. 12 VMD-TEO fault location analysis diagram

图 13 为以 A 相为例(相间短路为 AB 相), 转子绕组 3 种故障类型在不同的故障距离和短路电阻下



(a) 同相同分支匝间短路故障

(b) 同相异分支匝间短路故障

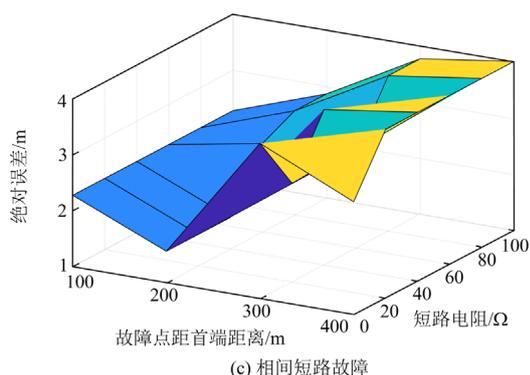


图 13 不同故障类型定位结果

Fig. 13 Locating results of different fault types

的定位结果。同相同分支短路故障、同相异分支短路故障和相间短路故障最大定位绝对误差分别为 3.79 m、8.66 m 和 4.03 m，均不超过 1 匝长度，相对最大误差分别为 1.26%、3.31% 和 2.28%。可见在各种故障类型下，定位均有较高的精度。同时由图 13 可知，增加短路电阻会一定程度增大故障定位的误差，但对定位的结果影响不大。

#### 4 短路故障严重程度判别

通常情况下，相间短路被视为一种严重的短路故障，而匝间短路则往往需要判断故障的严重程度，以采取不一样的处理措施。一般而言，匝间短路故障长度越长，被短接电势越高，而对发电机造成的影响越大。因此本文将故障长度视为匝间短路故障严重程度的诊断依据。转子绕组可看成有损传输线，因此行波在传输过程中必然伴随着衰减和变形，进而导致特征波形发生一定程度的畸变。显而易见，即使在同一故障程度下，若故障点距首端的位置不同，特征波形也会有所不同，因此有必要研究转子绕组发生短路故障时特征波形的变化规律，提出一种合适的故障因子来描述故障的严重程度。

利用在 PSCAD 中搭建的转子绕组模型，对不同故障点和故障长度下的转子绕组同相同分支匝间短路故障和同相异分支匝间短路故障进行仿真。图 14 给出了转子绕组同相同分支短路故障时，不同故障长度和故障位置对应特征波形幅值的变化情况，同相异分支匝间短路故障类似，不再给出。进一步研究特征波形幅值随故障点距离和故障长度变化的趋势，如图 15 所示。可总结特征波形有如下特点：  
 (1) 故障点位置距首端距离越远，特征波形幅值越小；  
 (2) 特征波形幅值随故障点距首端距离增加呈指数衰减规律，且不同故障距离时的衰减程度不同；  
 (3) 同一故障位置下，特征波形幅值会随故障长度的

增加而增大，且基本呈线性增长趋势。

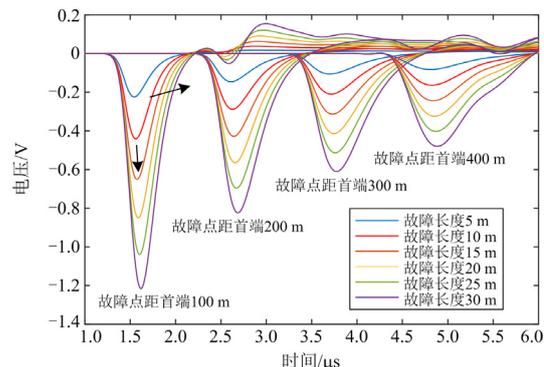
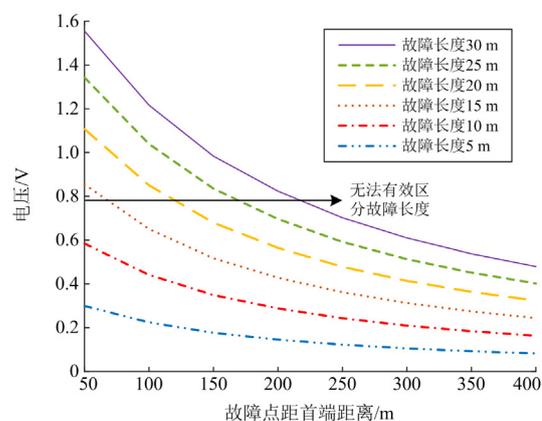
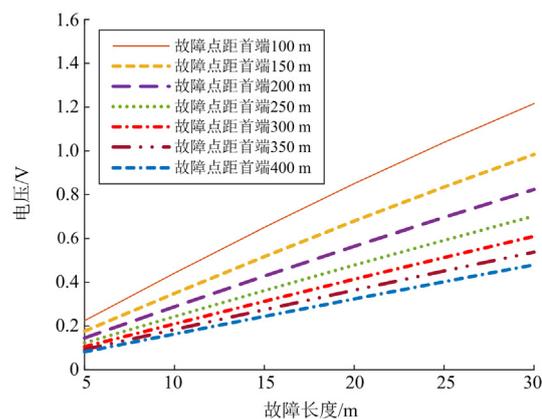


图 14 不同故障长度和故障位置的特征波形幅值

Fig. 14 Characteristic waveform amplitudes of different fault lengths and fault locations



(a) 特征幅值随故障点位置变化曲线



(b) 特征幅值随故障长度变化曲线

图 15 同相同分支匝间短路特征幅值变化情况

Fig. 15 Variation of characteristic amplitude of short circuit between turns of the same branch in the same phase

可以看出，单纯以幅值为故障严重程度的评价标准受故障位置影响较大，不同故障长度之间的特征幅值存在着较大的重叠区域，无法有效衡量故障严

重程度。本文提出采用拟指数特征还原法对特征波形的幅值进行处理,以克服行波衰减对故障程度因子造成的影响。综上可总结特征波形衰减特性近似为

$$A = A_0 e^{-\gamma d} \quad (12)$$

式中:  $A$  为特征波形的幅值;  $A_0$  为在首端发生短路故障时的特征波形幅值,不受行波衰减影响;  $\gamma$  为指数衰减因子,受脉冲波形频率、线路参数等多方面因素影响;  $d$  为故障点距首端的距离。进而得到同一故障程度下的指数还原故障因子为  $A^{zhe}(A_0) = A / e^{-\gamma d}$ 。

从测量得到的故障特征波形,可以得到特征波形的幅值  $A$  和利用本文提出的 VMD-TEO 方法得到故障点距首端的距离  $d$ 。对于指数衰减因子  $\gamma$ , 可通过下述方法得到。

根据第 2 节的分析,对于匝间短路的情况,非故障相注入脉冲在短路点产生的负极性反射波对非故障相原始波形的削减会导致特征波形出现一个极大值,其幅值可认为是故障点距首端  $(2L - d)$  位置处发生短路故障时对应的特征波形幅值。对于同相同分支匝间短路而言,该极大值往往为特征波形的正最大值,而对于同相异分支匝间短路,该极大值可通过反推时间定位得到,为  $t$  之后的第一个极大值。

$$t = t_0 + \frac{2 \times (2L - d)}{v} \quad (13)$$

因此得到某次故障时拟指数曲线上两点的幅值  $A_1$  和  $A_2$  及距离  $d_1$  和  $d_2$ , 联合式(14)和式(15)可得到指数衰减因子  $\gamma$ , 如式(16)所示。

$$A_1 = A_0 e^{-\gamma d_1} \quad (14)$$

$$A_2 = A_0 e^{-\gamma d_2} \quad (15)$$

$$\gamma = \frac{\ln(A_2 / A_1)}{d_1 - d_2} \quad (16)$$

图 16 所示为转子绕组发生匝间故障时采用上述

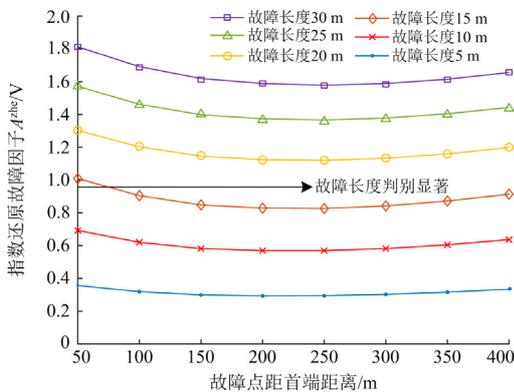


图 16 同相同分支匝间短路指数还原故障因子变化情况

Fig. 16 Variation of the exponential restoration fault factor of short circuit between turns of the same branch in the same phase

方法得到的指数还原故障因子的变化情况。相比于采用特征幅值衡量故障长度的方法,指数还原故障因子随故障点位置变化,具有较好的稳定性,不同故障长度之间重叠区域较小。又因为特征幅值和故障长度基本呈线性关系,因此采用指数还原故障因子能更有效地衡量故障程度。

## 5 结论

借鉴 RSO 在汽轮发电机转子绕组匝间短路故障诊断中的应用,本文提出了一种针对变速抽蓄机组转子绕组短路故障的离线诊断方法,并得到了以下结论。

1) 基于不同转子绕组短路故障下的脉冲响应特性分析,提出了转子绕组短路故障类型及故障识别方法。对于难以区分的两种匝间短路故障,提出利用最大峰值时差检测法对两种故障类型进行识别。结果表明该识别方法可以覆盖转子绕组约 90% 的长度,并且不受故障电阻的影响。

2) 采用变分模态分解和 Teager 能量结合的方法检测注入脉冲和特征曲线的起始时间,并根据两者之差和实测波速确定故障点的位置。结果表明该方法可对转子绕组各种类型的短路故障实现定位,并且定位误差均不超过转子绕组的单匝线圈长度。

3) 针对匝间短路故障,提出利用指数还原故障因子表征故障严重程度以改善故障位置对特征幅值的影响。仿真分析结果表明,指数还原故障因子可有效减小幅值重叠区域,具有更高的可靠性,满足工程需要。

## 附录 A

表 A1 变速抽蓄机组转子绕组参数

Table A1 Rotor winding parameters of VSPSU

参数	数值	参数	数值
绕组相数	3	极对数	7
每相分支数	2	极距/槽	21
每分支线圈数	49	绕组节距/槽	21
线圈长度/m	10.5	单相绕组电阻/mΩ	5.56
绕线形式	双层波绕组	单相绕组电感/mH	7.92
转子槽数	294	单相对地电容/μF	4

## 参考文献

- [1] REHMAN S, AL-HADHRAMI L M, ALAM M M. Pumped hydro energy storage system: a technological review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 44: 586-598.
- [2] 陈磊, 庄俊, 王志远, 等. 柔性直流输电系统的变速抽水蓄能机组直流电压辅助控制策略[J]. 电力系统保护

- 与控制, 2022, 50(4): 154-162.
- CHEN Lei, ZHUANG Jun, WANG Zhiyuan, et al. Auxiliary control strategy of DC voltage for variable speed pumped storage units in an HVDC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(4): 154-162.
- [3] 罗胤, 常玉红, 赵颖, 等. 计及电网频率稳定的抽水蓄能电站控制策略研究[J]. 智慧电力, 2022, 50(11): 97-103, 118.
- LUO Yin, CHANG Yuhong, ZHAO Ying, et al. Control policy of pumped storage power station based on power grid frequency stability[J]. Smart Power, 2022, 50(11): 97-103, 118.
- [4] 桑林卫, 卫璇, 许银亮, 等. 抽水蓄能助力风光稳定外送的最佳配置策略[J]. 中国电力, 2022, 55(12): 86-90, 123.
- SANG Linwei, WEI Xuan, XU Yinliang, et al. The optimal allocation strategy of pumped storage for the collaborative operation with wind/solar generation[J]. Electric Power, 2022, 55(12): 86-90, 123.
- [5] ALIZADEH B M, YANG W J, 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.
- [6] 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.
- [7] 李晓鹏, 李岩, 刘舒然, 等. 基于可变速抽水蓄能技术提升区域电网新能源消纳水平的研究[J]. 智慧电力, 2021, 49(10): 52-58, 112.
- LI Xiaopeng, LI Yan, LIU Shuran, et al. Research on promotion of renewable energy integration into regional power grid by variable speed pumped storage technology[J]. Smart Power, 2021, 49(10): 52-58, 112.
- [8] 王奎钢, 何铮, 康超, 等. GIS 抽水蓄能电站 VFTO 下壳体电位抬升特性及影响因素研究[J]. 高压电器, 2023, 59(4): 125-131.
- WANG Kuigang, HE Zheng, KANG Chao, et al. Study on characteristics and influencing factors of potential rise of enclosure under VFTO in GIS at pumped storage power station[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(4): 125-131.
- [9] 尹项根, 乔健, 王义凯, 等. 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[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(13): 1-10.
- YIN Xianggen, QIAO Jian, WANG Yikai, et al. Optimal configuration of main protection for a variable speed pumped storage power generator based on internal fault simulation[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(13): 1-10.
- [10] 陈俊, 叶宏, 李华忠, 等. 变速抽水蓄能机组转子绕组内部短路故障保护[J]. 中国电力, 2021, 54(12): 121-127, 136.
- CHEN Jun, YE Hong, LI Huazhong, et al. Internal short circuit protection for rotor winding of variable speed pumped-storage generator-Motor[J]. Electric Power, 2021, 54(12): 121-127, 136.
- [11] 李俊卿, 王栋. 双馈感应发电机转子匝间短路时定子电流谐波分析[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(21): 71-76.
- LI Junqing, WANG Dong. Analysis on stator current harmonics characteristics with rotor winding inter-turn short circuit fault in DFIG[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(21): 71-76.
- [12] 李俊卿, 沈亮印. 基于定子平均瞬时功率频谱特性的双馈风力发电机转子匝间短路的仿真分析[J]. 电机与控制应用, 2016, 43(8): 88-92.
- LI Junqing, SHEN Liangyin. Simulation analysis of doubly fed induction generator rotor inter-turn short circuits based on stator average instantaneous power spectrum characteristics[J]. Electric Machines & Control Application, 2016, 43(8): 88-92.
- [13] 魏书荣, 任子旭, 符杨, 等. 基于双侧磁链观测差的海上双馈风力发电机转子绕组匝间短路早期故障辨识[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(5): 1470-1479.
- WEI Shurong, REN Zixu, FU Yang, et al. Early stage inter-turn faults detection technique for the rotor windings of offshore wind DFIGs based on the differential value of two-side linkage's observation[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(5): 1470-1479.
- [14] 尹项根, 乔健, 贺儒飞, 等. 基于 FFT-LSTM 的变速抽蓄机组转子绕组短路故障和偏心故障诊断方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(6): 73-81.
- YIN Xianggen, QIAO Jian, HE Rufeifei, et al. FFT-LSTM-based fault diagnosis method for a rotor winding short circuit fault and rotor eccentricity fault of a variable-speed pumped storage unit[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(6): 73-81.
- [15] 贾志东, 陈海, 张征平, 等. 采用重复脉冲法诊断发电机转子绕组匝间短路故障[J]. 高电压技术, 2012, 38(11): 2927-2933.
- JIA Zhidong, CHEN Hai, ZHANG Zhengping, et al. Inter-turn short faults diagnosis on rotor windings of generator using repetitive surge oscilloscope[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(11): 2927-2933.
- [16] 岳啸鸣, 屈少平, 曹杰, 等. 汽轮发电机转子匝间短路

- RSO 检测应用浅析[J]. 大电机技术, 2019(3): 32-37.
- YUE Xiaoming, QU Shaoping, CAO Jie, et al. The application research on RSO detection of turbo-generator rotor inter turn short circuit[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2019(3): 32-37.
- [17] KERSZENBAUM I, MAUGHAN C. Utilization of repetitive surge oscillograph (RSO) in the detection of rotor shorted-turns in large turbine-driven generators[C] // 2011 Electrical Insulation Conference, June 5-8, 2011, Annapolis, Maryland, USA: 398-401.
- [18] 唐治平, 彭敏放, 李光明, 等. 基于重复脉冲法的变压器绕组匝间短路故障诊断[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(10): 153-158.
- TANG Zhiping, PENG Minfang, LI Guangming, et al. Diagnosis of inter-turn short circuit fault of transformer winding based on repetitive surge oscillograph[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(10): 153-158.
- [19] 李天辉, 贾伯岩, 唐明, 等. 最小能量法因子对 RSO 法检测匝间短路故障的时间差定位影响分析[J]. 高压电器, 2019, 55(5): 54-61.
- LI Tianhui, JIA Boyan, TANG Ming, et al. Influence of Minimum energy factor on time difference location accuracy of RSO for detecting inter-turn short circuit fault[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(5): 54-61.
- [20] 刘达, 彭敏放, 万勋, 等. 基于行波分析的变压器绕组匝间短路故障定位[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(9): 2091-2096.
- LIU Da, PENG Minfang, WAN Xun, et al. Inter-turn short-circuit fault location for transformer winding based on traveling wave analysis[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(9): 2091-2096.
- [21] 李天辉, 唐明, 贾伯岩, 等. 发电机转子匝间短路故障的建模仿真及诊断分析[J]. 高电压技术, 2019, 45(12): 3932-3940.
- LI Tianhui, TANG Ming, JIA Boyan, et al. Modeling simulation and diagnosis analysis of inter-turn short circuits fault in generator rotor[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(12): 3932-3940.
- [22] XIE L W, LUO L F, LI Y, et al. A traveling wave-based fault location method employing VMD-TEO for distribution network[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(4): 1987-1998.
- [23] 王帅, 毕天姝, 贾科. 基于小波时间熵的 MMC-HVDC 架空线路单极接地故障检测方法[J]. 电网技术, 2016, 40(7): 2179-2185.
- WANG Shuai, BI Tianshu, JIA Ke. Wavelet entropy based single pole grounding fault detection approach for MMC-HVDC overhead lines[J]. Power System Technology, 2016, 40(7): 2179-2185.
- [24] 张九思, 马宏忠, 李勇, 等. 基于 VMD 的变压器绕组松动故障分析与诊断[J]. 高压电器, 2021, 57(8): 198-208.
- ZHANG Jiushi, MA Hongzhong, LI Yong, et al. Analysis and diagnosis on looseness of transformer winding based on VMD[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(8): 198-208.
- [25] 乔健, 尹项根, 王义凯, 等. 变速抽蓄机组转子绕组接地故障保护及定位方法[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(3): 217-224.
- QIAO Jian, YIN Xianggen, WANG Yikai, et al. Protection and location method of rotor winding grounding fault for variable speed pumping storage unit[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(3): 217-224.
- [26] 赵海龙, 陈钦柱, 梁亚峰, 等. 一种小电流接地系统故障行波精确定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(19): 85-93.
- ZHAO Hailong, CHEN Qin Zhu, LIANG Yafeng, et al. A fault location method of single phase earth fault in small current neutral grounding system[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(19): 85-93.
- [27] 高艳丰, 朱永利, 闫红艳, 等. 基于 VMD 和 TEO 的高压输电线路雷击故障测距研究[J]. 电工技术学报, 2016, 31(1): 24-33.
- GAO Yanfeng, ZHU Yongli, YAN Hongyan, et al. Study on lightning fault locating of high-voltage transmission lines based on VMD and TEO[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(1): 24-33.
- [28] 范新桥, 朱永利. 基于双端行波原理的多端输电线路故障定位新方法[J]. 电网技术, 2013, 37(1): 261-269.
- FAN Xinqiao, ZHU Yongli. A novel fault location scheme for multi-terminal transmission lines based on principle of double-ended traveling wave[J]. Power System Technology, 2013, 37(1): 261-269.
- [29] 王桥梅, 吴浩, 杨杰, 等. 基于 Teager 能量算子和 1D-CNN 的 HVDC 输电线路故障识别方法[J]. 智慧电力, 2021, 49(5): 93-100.
- WANG Qiaomei, WU Hao, YANG Jie, et al. Fault identification method of HVDC transmission line based on Teager energy operator and 1D-CNN[J]. Smart Power, 2021, 49(5): 93-100.

收稿日期: 2023-04-13; 修回日期: 2023-06-20

作者简介:

卢庆辉(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: 908581621@qq.com

尹项根(1954—), 男, 通信作者, 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

(编辑 周金梅)