

基于量子遗传双稳态系统的配电网故障选线方法

高杰¹,程启明¹,程尹曼²,余德清¹,谭冯忍¹,张宇¹

(1. 上海电力学院 自动化工程学院 上海市电站自动化技术重点实验室,上海 200090;

2. 同济大学 电子与信息工程学院,上海 201804)

摘要:针对含分布式电源(DG)的配电网发生单相接地故障的情况,提出一种基于量子遗传双稳态系统的含DG配电网故障选线方法。首先,基于互相关余弦和量子遗传算法,对双稳态系统的势函数参数进行优化,并利用优化双稳态系统提取噪声背景下各线路的暂态零序电流。然后,求取各线路暂态零序电流的归一化能量系数,计算各线路的归一化余弦系数。最后,依据归一化能量系数和余弦系数求取各线路的特征角度,判定特征角度大于90°的线路为故障线路。大量仿真实验结果表明,所提方法不受高斯白噪声强度、故障电阻和故障距离等因素影响,具有可行性、有效性和应用性。

关键词:分布式电源;配电网;单相接地故障;暂态零序电流;故障选线;双稳态系统

中图分类号:TM 761

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.05.024

0 引言

我国6~35 kV配电网的中性点常采用经消弧线圈接地的运行方式,其可补偿单相接地短路过程中的电容电流,允许故障后线路工作1~2 h,所以在实际配电网中得到了广泛应用^[1],但这种运行方式也存在故障电流微弱、电弧不稳定和易受外界噪声干扰等问题^[2]。另外,随着我国的分布式电源DG(Distributed Generation)并网技术的日渐成熟,越来越多的DG将以直接或微电网的方式并入电网。因此,快速、准确地选出故障线路对配电网和DG的安全稳定运行具有重要意义。

当DG并网后,DG的接入会改变各相故障电流的分布,但不会改变各线路首端零序电流之间幅值和极性的差异,则原有的利用零序电流信息作为选线判据的方法可继续使用^[3-4]。近年来,基于零序电流暂态量的故障选线研究取得了大量成果。文献[3]采用希尔伯特-黄变换HHT(Hilbert-Huang Transform)和数字陷波器分别获取非工频零序电流的能量和5次谐波极性。文献[5]依据暂态零序电流波形的相似性原理,构建反映零序电流波形及幅值的相对熵特征矩阵,并利用模糊核聚类算法实现选线。文献[6]按照最大能量原则,利用小波包变换WPT(Wavelet Packet Transform)对暂态零序电流进行分解并提取特征频带,并将特征频带导入改进振子系

统进行故障选线,但是其在发生高阻接地故障和存在噪声干扰时会因故障特征微弱而出现误判。文献[7]采用暂态零序电流小波包分解系数的极性和模值关系进行选线,并考虑了不同线路具有不同特征频带的情况,但在强噪声背景下,噪声会削弱零序电流之间的幅值和极性差异,这会导致小波变换所选取的特征频带可能为非有效特征频带,进而导致误判^[8]。另外,暂态零序电流常常会呈现小幅值特性,这使得故障选线难度增加,再加上噪声会使故障特征微弱程度加剧,因此,对如何在噪声背景下有效提取故障信号以及提高含DG配电网故障选线准确率进行研究具有重要意义。

针对强噪声背景下的检测信号,随机共振具有其独特的优势^[9],它利用信号和噪声在非线性系统中的协同作用,达到提取强噪声背景下微弱信号的目的^[10],其中,双稳态系统是一种常用于研究随机共振的数学模型^[11]。因此,为更好地提取强噪声背景下的暂态零序电流,本文对双稳态系统的势函数参数进行量子遗传算法QGA(Quantum Genetic Algorithm)优化,并提出一种特征电流的提取方法,在此基础上,通过求取各线路的归一化能量系数、余弦系数及特征角度来确定故障线路。MATLAB/Simulink软件的仿真结果验证了本文所提方法的有效性和可行性。

1 单相接地故障的特征分析

由文献[3,12]可知,无论故障发生在哪条线路,DG的接入均会影响各相相电流的大小,且各相相电流的大小和暂态特性会随DG容量的变化而变化,故难以确定。

而对各线路出口处而言,无论哪条线路发生单相接地故障,健全线路的暂态零序电流的方向与故障线路的方向仍然相反。其原因为健全线路和消弧

收稿日期:2017-04-18;修回日期:2018-04-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61573239);上海市重点科技攻关计划资助项目(14110500700);上海市电站自动化技术重点实验室项目(13DZ2273800)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(61573239), the Key Science and Technology Plan of Shanghai Science and Technology Commission(14110500700) and Shanghai Key Laboratory Power Station Automation Technology Laboratory(13DZ2273800)

线圈的零序电流之和仍等于故障线路的零序电流,健全线路的零序电流之和是其自身对地电容电流的叠加。因此, DG 的接入不影响故障线路与健全线路之间的这种差异,所以原有的利用零序电流信息和相关性理论进行选线的方法仍然可用。

然而受自然环境、线路架空距离地等因素影响,配电网中常发生非理想导体的单相高阻接地故障,研究和实验数据表明,高阻接地故障的故障电流一般为 $0 \sim 75 \text{ A}$ [13]。例如,文献[14]中给出的实例表明,当 10 kV 馈线跌落池塘中时,故障点电流仅为 14.6 A 。文献[15]中,其配电网的 5 条线路的长度分别为 $12, 9, 5, 14, 10 \text{ km}$,当线路 4 距离母线 7 km 处发生 1000Ω 单相接地故障时,其零序电流的峰值小于 1 A 。因此,随着故障条件和配电网的线路长度等条件的变化,暂态零序电流出现小幅值的可能性较大。

如何有效检测小幅值暂态零序电流这种微弱特征信号一直是故障选线的难点,另外,在强噪声干扰下,暂态零序电流的极性和幅值特征都将被噪声淹没,即其信号将变得更加微弱,这时若仍以相关性理论来区分故障线路和健全线路,选线准确率将大幅降低。双稳态系统在提取强噪声背景下的微弱信号时具有一定的优势,因此,下文将利用双稳态系统提取强噪声背景下的微弱暂态零序电流,进而改善基于相关性理论的故障选线方法。

2 优化双稳态系统检测暂态零序电流

2.1 双稳态系统

双稳态系统常被用来研究随机共振,其数学模型 [17] 为:

$$dx/dt = ax - bx^3 + s(t) + \Gamma(t) \quad (1)$$

其中, a, b 为势函数参数; $s(t)$ 为输入信号; $\Gamma(t)$ 为高斯白噪声; x 为布朗粒子运动速度; t 为时间。

式(1)实质上描述了单位质点同时受到外力和噪声驱动时,在双势阱中的过阻尼运动,当信号、噪声以及系统非线性达到某种匹配时,质点可以从原来的势阱跃迁到另外一个势阱,从而使系统的输出得到增强。最初随机共振的研究局限于输入为周期信号的场合,但随着研究的深入,发现随机共振也可以用来处理非周期信号。

以 $s(t)$ 为高斯色噪声这类非周期信号为例,则由线性响应理论和相关理论可得 $s(t)$ 和 $x(t)$ 之间的互相关系数 ρ_{sx} 可表示为:

$$\rho_{sx} = \left\{ \frac{\lambda_m \tau_0}{1 + \lambda_m \tau_0} \left[1 - \frac{D^2(1 + \lambda_m \tau_0)}{D^2(1 + \lambda_m \tau_0) + Q_q \lambda_m \tau_0 x_{st}^2} \right] \right\}^{-1/2} \quad (2)$$

其中, τ_0 为相关时间; λ_m 为 2 倍的 Kramers 跃迁率, $\lambda_m = (\sqrt{2}a/\pi) e^{-a^2/(4b)}$; x_{st}^2 为未受扰双稳态系统输出 2

阶矩的稳态值, $x_{st}^2 = a/b$; Q_q 为均值; D 为噪声强度。

图 1 为互相关系数 ρ_{sx} 随相关参数的变化曲线。当 a 和 b 均为 1 (也称为经验参数) 且 Q_q, τ_0 和 x_{st}^2 分别为 $0.01, 10$ 和 1 时,根据式(2)绘制出 ρ_{sx} 随噪声强度 D 的变化曲线,如图 1(a) 所示。图 1(a) 具备随机共振现象的特征,也即 ρ_{sx} 随着 D 的变化曲线呈现出 1 个峰值。这表明双稳态系统中存在非周期随机共振,因此,可利用双稳态系统来检测强噪声背景下的非周期信号。

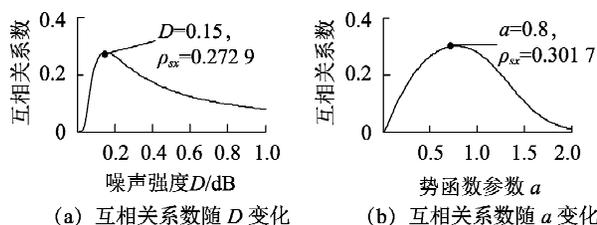


图 1 互相关系数变化曲线

Fig.1 Curve of cross correlation coefficient change

但由式(2)可知,在某一固定噪声背景下,势函数参数 a, b 也会影响 ρ_{sx} 的大小,因此,设定 $D = 0.15, x_{st}^2 = a$ 且其他参数不变,则由式(2)可绘出 ρ_{sx} 随势函数参数 a 的变化曲线,如图 1(b) 所示。由图 1(b) 可知, ρ_{sx} 随势函数参数的变化而变化,并具有随机共振特征。此外,在 $a = 0.8$ 时, $\rho_{sx} = 0.3017$, 高于经验参数条件下的互相关系数。这表明在一定的噪声强度下,选取合适的势函数参数能够进一步提高互相关系数,也即提高了检测效果,因此,如何选取合适的势函数参数成为影响双稳态系统有效提取非周期信号的关键因素。

为使双稳态系统能更好地提取噪声背景下的暂态零序电流,下文利用夹角余弦、互相关系数和量子遗传算法对双稳态系统的势函数参数进行优化。

2.2 优化双稳态系统检测暂态零序电流

量子遗传算法利用量子逻辑门实现染色体的演化,达到了比常规的遗传算法(GA)更好的效果 [16]。因此,本文采用量子遗传算法对双稳态系统的势函数参数进行优化,以使双稳态系统能有效检测强噪声背景下的零序电流,其流程图见图 2。

2.2.1 算法参数

种群规模、迭代次数越大,优化的结果越好,同时计算量也越大,在实际应用中往往需要进行折中处理,因此,本文选取最大迭代次数为 100、每个种群规模为 50。

2.2.2 种群初始化及个体测试

由于优化参数有 3 个,即 a, b 和数值计算步长 h ,因此具有 3 个种群,它们的优化参数范围分别为 $a \in [-10, 10], b \in [0, 10]$ 和 $h \in [0.001, 0.2]$ 。对每个种群的个体采用量子比特编码,其每个个体的染

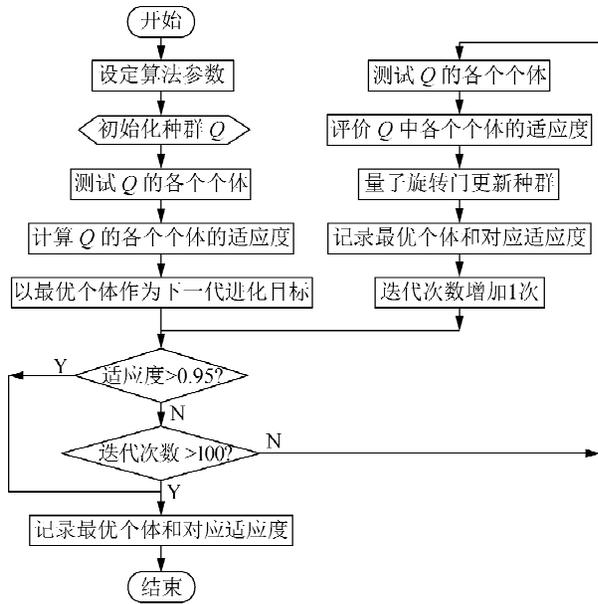


图 2 量子遗传算法优化双稳态系统参数流程图

Fig.2 Flowchart of optimizing bistable system parameters by QGA
染色体结构可表示为:

$$\mathbf{q}_j^T = \left(\begin{array}{c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c} \alpha_{11}^T & \alpha_{12}^T & \cdots & \alpha_{1k}^T & \alpha_{21}^T & \alpha_{22}^T & \cdots & \alpha_{2k}^T & \alpha_{m1}^T & \alpha_{m2}^T & \cdots & \alpha_{mk}^T \\ \beta_{11}^T & \beta_{12}^T & \cdots & \beta_{1k}^T & \beta_{21}^T & \beta_{22}^T & \cdots & \beta_{2k}^T & \beta_{m1}^T & \beta_{m2}^T & \cdots & \beta_{mk}^T \end{array} \right) \quad (3)$$

其中, \mathbf{q}_j^T 为第 T 代、第 j 个个体的染色体; k 为编码每个基因的量子比特数; m 为染色体的基因个数; α 和 β 分别为 $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$ 的概率幅, 且满足归一化条件, 即它们的平方和为 1。

然后再将种群各个个体的量子比特编码随机初始化为 $(1/\sqrt{2}, 1/\sqrt{2})$, 这意味着 1 个染色体所表达的全部可能状态是等概率的。对初始种群的个体进行 1 次测量, 可获得 1 组确定的解 $P(t) = \{p_1^T, p_2^T, \dots, p_n^T\}$, 其中, p_j^T 为第 T 代中第 j 个解, 表现形式为长度为 m 的二进制串, 对其进行十进制转换, 可得 a, b 及 h 的优化值分别为 X_1, X_2 和 X_3 。

2.2.3 个体适应度函数求解

本文采用的个体适应度函数为理想暂态零序电流 $i_z(t)$ ^[17] 和经双稳态系统提取后的特征电流 $i_{cz}(t)$ 之间的互相关余弦 H_c 。 $i_z(t)$ 可表示为:

$$i_z(t) = i_1(t) + i_2(t) + i_3(t) + i_4(t) \quad (4)$$

$$\begin{cases} i_1(t) = \sin(2\pi \times 50t + 60^\circ) \\ i_2(t) = 4e^{-56t} \sin(2\pi \times 250t + 30^\circ) \\ i_3(t) = 7.2e^{-102t} \sin(2\pi \times 315t) \\ i_4(t) = e^{-5.5t} \end{cases} \quad (5)$$

$i_z(t)$ 信号是按照中性点经消弧线圈接地系统发生单相接地故障时暂态零模电流信号的特点生成的^[19], 其采样频率为 20 kHz。

对 $i_z(t)$ 添加信噪比为 -1 dB 的高斯白噪声可得

含噪声的暂态零序电流 $i_{zg}(t)$ 。

对式(1)进行 4 阶龙格-库塔算法求解可得输出信号 $i_{cg}(t)$, 即提取噪声背景下的信号。

个体适应度函数的具体求解过程如下。

步骤 1: 对含噪声的暂态零序电流 $i_{zg}(t)$ 进行归一化处理后得归一化电流 $i_{gg}(t)$ 。

步骤 2: 设定式(1)中的 a, b 和 $s(t) + \Gamma(t)$ 分别为 X_1, X_2 和 $i_{gg}(t)$ 。

步骤 3: 对式(1)进行 4 阶龙格-库塔算法求解可得输出电流 $i_{cg}(t)$, 对 $i_{cg}(t)$ 进行反归一化可得特征电流 $i_{cz}(t)$, 其中, 数值计算步长为 X_3 。

步骤 4: 按照式(6)求取 $i_{cz}(t)$ 与 $i_z(t)$ 之间的互相关余弦 H_c, H_c 即为个体适应度, 其表达式如下。

$$H_c = qc + (1-q)\rho_{cz} \quad (6)$$

$$\rho_{cz} = \frac{E_{(icz \cdot iz)} - E_{icz}E_{iz}}{\sqrt{D\{i_{cz}(t)\}} \sqrt{D\{i_z(t)\}}} c = \frac{\sum_{t=1}^N i_z(t) i_{cz}(t)}{\left[\sum_{t=1}^N i_z^2(t) \sum_{t=1}^N i_{cz}^2(t) \right]^{1/2}} \quad (7)$$

其中, q 为权重, 取值范围为 0 ~ 1; E 表示期望; $E_{(icz \cdot iz)}$ 为信号 $i_{cz}(t)$ 、 $i_z(t)$ 乘积的期望; t, N 分别为采样点和最大采样点数; ρ_{cz}, c 分别为两信号之间的互相关系数、夹角余弦。由互相关系数和夹角余弦的定义可知, 互相关系数越大, 两信号之间的相似程度越高, 夹角余弦越大, 两信号之间的相似程度越高。因此, 式(6)中的 H_c 越大, 则两信号间的相似程度越高。

2.2.4 量子旋转门

量子遗传算法中, 旋转门是最终实现演化操作的执行机构。本文使用一种通用的、与问题无关的调整策略^[17]。

2.3 优化参数的适应性分析

利用图 2 所示的优化算法, 可得双稳态系统输出波形, 如图 3 所示。采样频率和仿真时间分别为 20 kHz 和 0.06 s 时, $i_z(t)$ 的波形见图 3(a); $i_{zg}(t)$ 的信噪比为 -1 dB, 其波形见图 3(b); H_c 的最大值为 0.937 9, 对应的势函数优化参数为 $a = -1.083 6, b = 0.834 0$, 数值计算步长 $h = 0.195 8$, 图 3(c) 为特征电流; 保持 h 不变, 设定 a, b 为经验参数 (即 $a = b = 1$), 可得特征电流 $i_c(t)$ 如图 3(d) 所示。

图 3 中, $i_{cz}(t)$ 的瞬时值较 $i_z(t)$ 有一定增加, 另外, $i_{cz}(t)$ 和 $i_c(t)$ 的含噪声量都明显少于 $i_{zg}(t)$, 并且 $i_{cz}(t)$ 与 $i_z(t)$ 之间的互相关余弦为 0.937 9, 但 $i_c(t)$ 变形严重, 这表明优化参数检测零序电流的性能优于经验参数。因此, 选取合适的优化参数能使双稳态系统更好地检测强噪声背景下的零序电流。

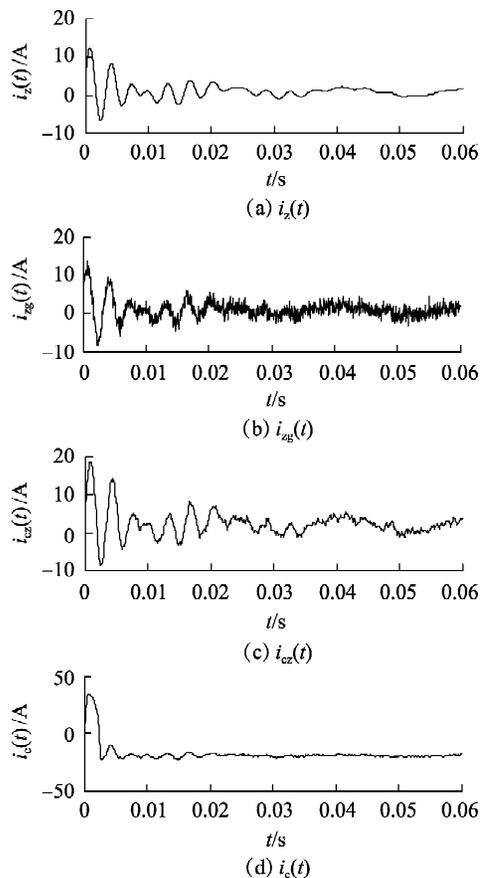


图3 双稳态系统输出波形

Fig.3 Output waveforms of bistable system

3 选线方法

在经量子遗传算法确定双稳态系统的优化参数后,下文将利用夹角余弦和信号能量对各线路进行故障特征量获取,进而根据特征量来检测故障线路。

3.1 特征量获取

a. 步骤1:获取各线路故障后1.25个工频周期的暂态零序电流 $i_{zg}^n(t)$ (n 为线路编号, $n=1,2,\dots,s$ (s 为线路总数)),对其进行归一化处理得归一化电流 $i_{zg}^n(t)$,用 $i_{zg}^n(t)$ 替换式(1)中的 $s(t)+\Gamma(t)$ 。

b. 步骤2:利用4阶龙格-库塔算法求解式(1),并将输出电流进行反归一化可得特征电流 $i_{cz}^n(t)$ 。

c. 步骤3:对各线路的特征电流按式(8)求取夹角余弦矩阵 $M_{n \times n}$ 。

$$M_{n \times n} = \begin{bmatrix} c_{11} & \cdots & c_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{n1} & \cdots & c_{nn} \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中, n 为线路编号; c_{ij} ($i, j=1,2,\dots,n$) 为线路 L_i 和 L_j 特征电流之间的夹角余弦。

d. 步骤4:由式(9)求取各线路的归一化余弦系数 g_n 。

$$g_n = m_n / \max(m_n) \quad (9)$$

$$m_n = \sum_{j=1}^s c_{nj} \quad n=1,2,\dots,s \quad (10)$$

其中, j 为线路编号。

式(10)中 g_n 的取值范围为 $[-1,1]$, g_n 越小且为负,表示 L_n 与其他线路的极性相反的可能性越大,也即 L_n 为故障线路的可能性越大。

e. 步骤5:由式(11)对各线路的特征电流求取归一化能量系数 e_n 。

$$e_n = E_n / \max(E_n) \quad (11)$$

$$E_n = \sum_{t=1}^N [i_{cz}^n(t)]^2 \quad (12)$$

式(11)中 e_n 的取值范围为 $(0,1]$, e_n 越大表示 L_n 的能量越大,其为故障线路的可能性越大。

f. 步骤6:以归一化余弦系数为横坐标、归一化能量系数为纵坐标,按式(13)求取各线路的特征角度 θ_n 。

$$\theta_n = \begin{cases} \arctan(e_n/g_n) & e_n/g_n > 0 \\ \arctan(e_n/g_n) + \pi/2 & e_n/g_n < 0 \end{cases} \quad (13)$$

由式(13)知,当 $e_n/g_n > 0$ 时,随着 e_n 的增加和 g_n 的减小, θ_n 增加且 θ_n 的范围为 $(0, \pi/2)$; 当 $e_n/g_n < 0$ 时,随着 e_n 的增加和 g_n 的减小, θ_n 增加且 θ_n 的范围为 $(\pi/2, 3\pi/4]$ 。当 θ_n 的范围为 $(\pi/2, 3\pi/4]$ 时, θ_n 越大表示 L_n 为故障线路的可能性越大。

3.2 故障线路检测判据

a. 步骤1:令 n 为1,也即从 L_1 开始检测。

b. 步骤2:判断 L_1 的特征角度是否大于 90° ,若是,则判定为故障线路,检测结束;否则,转入步骤3。

c. 步骤3:令 $n=n+1$,判断 L_n 的特征角度是否大于 90° ,若大于,则判定为故障线路,检测结束;否则,转入步骤4。

d. 步骤4:判断 n 是否等于线路总和 s ,若是,则判定为母线故障,检测结束;否则,转入步骤3。

4 算例分析

在 MATLAB/Simulink 中搭建含 DG 的配电网,如图4所示。图中, DG_1 为旋转型 DG,容量为 $3 \text{ MV} \cdot \text{A}$,经 6 km 电缆线路与 L_6 相连; DG_2 为逆变型 DG,容量为 $2 \text{ MV} \cdot \text{A}$,只输出有功功率,直接与 L_2 相连。线路参数的取值见表1。消弧线圈的电感和电阻值可表示为:

$$L = 1 / [3\omega^2(l_D C_D + l_J C_J)(1+p)] \quad (14)$$

$$R_L = 0.03\omega L \quad (15)$$

其中, L 为消弧线圈的电感; R_L 为消弧线圈的电阻; C_D, l_D 分别为电缆线路的单位零序电容、长度; C_J, l_J 分别为架空线路的单位零序电容、长度。

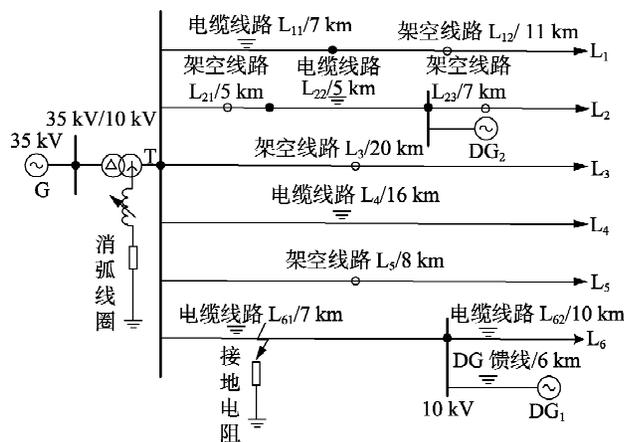


图 4 含 DG 配电网结构图

Fig.4 Structure of distribution network with DG

表 1 线路参数

Table 1 Line parameters

线路类型	相序	电阻/ ($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	电感/ ($\text{mH} \cdot \text{km}^{-1}$)	电容/ ($\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}$)
架空线路	正序	0.170 0	1.210 0	0.009 7
	负序	0.230 0	5.480 0	0.006 0
电缆线路	正序	0.265 0	0.255 0	0.170 0
	负序	2.540 0	1.019 0	0.153 0

4.1 优化参数的确定

由于谐振接地系统发生单相接地故障时,故障电阻对暂态零序电流的影响很大。暂态零序电流的幅值与故障电阻成反比,则暂态零序电流幅值不同,其暂态特性也不同^[19],因此,本文以图 4 所示的含 DG 的 6 馈线配电网为例,以峰值范围为 0.1~200 A 的暂态零序电流为训练样本,利用量子遗传算法优化势函数参数和计算步长,通过大量仿真实验确定了势函数参数 $a = -0.960 2$ 、 $b = 6.239 0$ 和计算步长 $h = 0.063 5$ 。

4.2 不同接地电阻下的故障选线

在补偿度为 8%,即消弧线圈的 $L = 0.388 5 \text{ H}$ 、 $R_L = 3.662 \Omega$ 的情况下,当相电压相角达到 0° 时, L_6 发生金属性接地故障,接地位置距离母线 5 km,信噪比为 -1 dB 。表 2 给出了不同接地电阻下的故障选线结果。图 5 给出了 L_4 的无噪声暂态零序电流 $i_z^4(t)$ 、含噪声暂态零序电流 $i_{zg}^4(t)$ 以及特征电流 $i_{cz}^4(t)$,其中,各电流的时间长度为 $0.04 \sim 0.075 \text{ s}$ 。图 6 给出经双稳态系统处理后各线路的特征角度。

由图 5(a)和图 5(b)对比可知,在 -1 dB 的噪声背景下, L_4 的暂态零序电流被淹没在噪声中,其极性和幅值分辨困难且 $i_z^4(t)$ 与 $i_{zg}^4(t)$ 之间的互相关余弦仅为 0.61;而经双稳态系统处理后,由图 5(c)可知, $i_{cz}^4(t)$ 的噪声含量明显少于 $i_{zg}^4(t)$,分辨 $i_{cz}^4(t)$ 的极性和幅值较为容易,且 $i_{cz}^4(t)$ 与 $i_z^4(t)$ 之间的互相关余弦为 0.92,因此,双稳态系统能有效地提取强噪声背景下的暂态零序电流。

表 2 不同接地电阻下的故障选线结果

Table 2 Results of faulty line selection under different grounding resistances

故障线路	故障初相角/ $(^\circ)$	接地电阻/ Ω	θ_n	故障选线结果	
L_6	0	10	$\theta_1 = 0.34^\circ, \theta_2 = 86.54^\circ,$ $\theta_3 = 0.22^\circ, \theta_4 = 0.95^\circ,$ $\theta_5 = 0.23^\circ, \theta_6 = 101.48^\circ$	L_6	
			100	$\theta_1 = 0.54^\circ, \theta_2 = 79.98^\circ,$ $\theta_3 = 0.45^\circ, \theta_4 = 1.49^\circ,$ $\theta_5 = 0.40^\circ, \theta_6 = 106.43^\circ$	L_6
				$\theta_1 = 0.87^\circ, \theta_2 = 74.16^\circ,$ $\theta_3 = 0.71^\circ, \theta_4 = 2.02^\circ,$ $\theta_5 = 0.57^\circ, \theta_6 = 110.37^\circ$	L_6

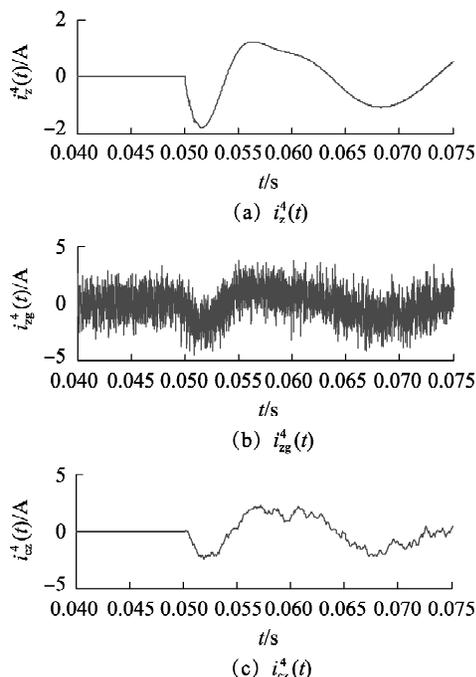
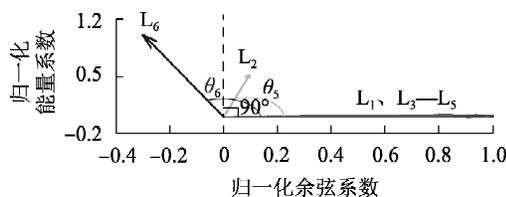
图 5 不同状态下 L_4 的暂态零序电流Fig.5 Transient zero-sequence current of L_4 in different situations

图 6 特征角度

Fig.6 Feature angle

图 6 中, L_6 的 $\theta_6 = 110.37^\circ$ 、 $e_6 = 1$ 、 $g_6 < 0$,而其他线路的 θ_n 均小于 90° 、 e_n 均小于 1、 g_n 均为正,则故障线路的极性与健全线路相反,能量大于健全线路,因此判定 L_6 为故障线路。

4.3 与其他方法进行对比

小波阈值法是目前应用较为广泛的在噪声背景下提取信号的方法,下文将本文所提量子遗传双稳态法与小波阈值法^[20]相比较,以体现本文所提方法

的优势。在信噪比为-1 dB和故障初相角为30°的情况下,表3、4分别给出本文方法和小波阈值方法得到的故障选线结果。由表3和表4对比可知,当接地电阻较小时,2种方法均能准确选线,而当接地电阻增大到500 Ω时,小波阈值法出现误判。

表3 本文方法得到的故障选线结果

信噪比/dB	故障线路	接地电阻/Ω	θ_n	故障选线结果
-1	L_6	50	$\theta_1 = 0.33^\circ, \theta_2 = 86.19^\circ,$	L_6
			$\theta_3 = 0.22^\circ, \theta_4 = 0.97^\circ,$	
		100	$\theta_5 = 0.22^\circ, \theta_6 = 101.94^\circ$	L_6
			$\theta_1 = 0.62^\circ, \theta_2 = 81.88^\circ,$	
			$\theta_3 = 0.38^\circ, \theta_4 = 1.53^\circ,$	
			$\theta_5 = 0.39^\circ, \theta_6 = 105.19^\circ$	
500	$\theta_1 = 0.95^\circ, \theta_2 = 81.28^\circ,$	L_6		
	$\theta_3 = 0.62^\circ, \theta_4 = 2.13^\circ,$			
	$\theta_5 = 0.56^\circ, \theta_6 = 104.17^\circ$			

表4 小波阈值方法得到的故障选线结果

Table 4 Results of faulty line selection by wavelet thresholding method

信噪比/dB	故障线路	接地电阻/Ω	θ_n	故障选线结果
-1	L_6	50	$\theta_1 = 0.31^\circ, \theta_2 = 89.49^\circ,$	L_6
			$\theta_3 = 0.19^\circ, \theta_4 = 0.88^\circ,$	
		100	$\theta_5 = 0.19^\circ, \theta_6 = 101.46^\circ$	L_6
			$\theta_1 = 0.36^\circ, \theta_2 = 88.49^\circ,$	
			$\theta_3 = 0.22^\circ, \theta_4 = 1.04^\circ,$	
			$\theta_5 = 0.21^\circ, \theta_6 = 103.09^\circ$	
500	$\theta_1 = 0.49^\circ, \theta_2 = 100.07^\circ,$	错误		
	$\theta_3 = 0.39^\circ, \theta_4 = 0.94^\circ,$			
	$\theta_5 = 0.35^\circ, \theta_6 = 98.56^\circ$			

以故障电阻为500 Ω为例来说明误判产生的原因。附录中的图A1给出了本文方法下的各线路的提取电流,图A2给出了小波阈值方法下的提取电流。由图A1和图A2对比可知,小波阈值法的含噪量高于本文方法。计算得图A1中各提取电流与无噪声电流之间的夹角余弦依次为0.891 9、0.984 6、0.895 2、0.917 0、0.883 7和0.975 1,计算图A2中各提取电流与无噪声电流之间的夹角余弦依次为0.782 0、0.997 0、0.702 3、0.939 2、0.764 7和0.998 6。由夹角余弦对比可知,在强噪声背景下,本文方法所获得的电流的互相关余弦基本都维持在0.9,这表明了提取电流基本与无噪声电流一致。而小波阈值法会使某些线路的互相关余弦低于0.8,这表明处理后的电流与无噪声电流之间具有比较大的误差,这即为误判产生的原因。因此,本文所提方法优于小波阈值法。

4.4 适应性分析

在补偿度为8%、相电压相角达到0°的情况下, L_6 发生金属性接地故障,接地位置距母线5 km。附

录中的表A1给出了信噪比分别为-1 dB、10 dB和30 dB时的故障选线结果。由表A1可知,在大过渡电阻故障下,故障选线结果不受信噪比影响。

在补偿度为8%的情况下, L_5 发生金属性接地故障,接地位置距母线5 km,接地电阻为100 Ω,信噪比为-1 dB。附录中的表A2给出故障相角分别为0°、30°、60°和90°时的故障选线结果。由表A2可知,本文方法不受故障相角影响,在发生电压相角过零故障时也能准确选线。

分别设置消弧线圈补偿度为5%、8%和10%,在 L_4 距离母线8 km发生单相接地故障,相电压过零,接地电阻为100 Ω,信噪比为-1 dB,此时按照本文方法所得的故障选线结果见附录中的表A3。由表A3可知,本文方法的故障选线结果不受消弧线圈补偿度的影响。

接地故障的发生位置将影响系统的零序阻抗。在补偿度为8%、相电压过零、接地电阻为500 Ω、信噪比为-1 dB时, L_6 在距离母线的不同位置发生单相接地故障,附录中的表A4给出了本文方法的故障选线结果。由表A4可知,在发生长距离故障时本文方法也能选出故障线路。

在补偿度为8%、相电压过零的情况下,在 L_2 距离母线5 km处发生间歇性电弧故障,电弧的熄灭和重燃的时间为:燃弧时刻为0.05 s、0.07 s和0.09 s,熄弧时刻为0.06 s、0.08 s,附录中的表A5给出了本文方法的故障选线结果。由表A5可见,在弧道电阻不同时,本文方法在不同的电弧故障下也能准确选线。

5 结论

本文提出一种基于量子遗传双稳态系统的含DG配电网故障选线方法,大量仿真实验验证了本文方法的正确性和可行性,具有参考价值。本文所得结论如下:

a. 经互相关余弦和量子遗传算法优化后的双稳态系统,能有效地对噪声背景下的暂态零序电流的波形进行降噪和整形;

b. 定义的特征角度包含了暂态零序电流的极性和能量特征,基于特征角度提出的选线方法适用于不同接地电阻、噪声强度、消弧线圈补偿度及电弧故障等故障情况。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 朱珂,王怡轩,倪建. 主动干扰技术在消弧线圈接地系统故障选线中的应用[J]. 电力自动化设备,2017,37(10):189-196.
ZHU Ke, WANG Yixuan, NI Jian. Application of active disturbance technology in faulty line selection of arc suppression coil grounding system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(10):

- 189-196.
- [2] WANG Xiaowei, WEI Yanfang, ZENG Zhihui. Fault line selection method of small current to ground system based on atomic sparse decomposition and extreme learning machine[J]. Journal of Sensors, 2015, 2015(10): 1-19.
- [3] 金涛, 褚福亮. 基于暂态非工频零序电流的含 DG 新型配电网的接地选线方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(9): 96-105.
JIN Tao, CHU Fuliang. A fault line-selection method in new distribution network with DG based on transient non-power frequency zero sequence current[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(9): 96-105.
- [4] 束洪春. 谐振接地系统虚拟接地的辨识和综合选线方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6): 122-129.
SHU Hongchun. Unreal grounding identification and comprehensive line selection for resonant grounding system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 122-129.
- [5] 郭谋发, 严敏, 陈彬, 等. 基于波形时域特征聚类法的谐振接地系统故障选线[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(11): 59-66.
GUO Moufa, YAN Min, CHEN Bin, et al. Faulty line selection based on waveform feature clustering in time domain for resonance grounding system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(11): 59-66.
- [6] WANG Xiaowei, GAO Jie, WEI Xiangxiang, et al. A novel fault line selection method based on improved oscillator system of power distribution network[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2014, 2014(10): 1-19.
- [7] 刘渝根, 王建南, 马晋佩, 等. 结合小波包变换和 5 次谐波法的谐振接地系统综合故障选线方法[J]. 高电压技术, 2015, 41(5): 1519-1525.
LIU Yugen, WANG Jiannan, MA Jinpei, et al. Comprehensive fault line selection method for resonant grounded system combining wavelet packet transform with fifth harmonic method[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(5): 1519-1525.
- [8] 李雅洁, 孟晓丽, 宋晓辉, 等. 基于最优 FIR 滤波器与层次聚类的配电网单相接地故障选线方法[J]. 电网技术, 2015, 39(1): 143-149.
LI Yajie, MENG Xiaoli, SONG Xiaohui, et al. Single-phase-to-ground fault line detection for distribution network based on optimal finite impulse response filter and hierarchical clustering[J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 143-149.
- [9] WANG Jun, HE Qingbo, KONG Fanrang. Adaptive multiscale noise tuning stochastic resonance for health diagnosis of rolling element bearings[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2015, 64(2): 564-577.
- [10] 李永波, 徐敏强, 赵海洋, 等. 级联双稳随机共振和基于 Hermite 插值的局部均值分解方法在齿轮故障诊断中应用[J]. 振动与冲击, 2015, 34(5): 95-101.
LI Yongbo, XU Minqiang, ZHAO Haiyang, et al. Application of cascaded bi-stable stochastic resonance and Hermite interpolation local mean decomposition method in gear fault diagnosis[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(5): 95-101.
- [11] LU Siliang, HE Qingbo, HU Fei, et al. Sequential multiscale noise tuning stochastic resonance for train bearing fault diagnosis in an embedded system[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2014, 63(1): 106-116.
- [12] 钱虹, 黄正润, 阮大兵. 含 DG 的小电流接地系统单相接地故障定位[J]. 电机与控制学报, 2014, 18(8): 17-23.
QIAN Hong, HUANG Zhengrun, RUAN Dabing. Single phase-to-earth fault location of small current grounding system with distributed generation[J]. Electric Machines and Control, 2014, 18(8): 17-23.
- [13] 崔骅. 配电网高阻接地故障检测技术的研究[D]. 北京: 清华大学, 2009.
CUI Tao. Research on high resistance grounding fault detection technology for distribution lines[D]. Beijing: Tsinghua University, 2009.
- [14] 刘育权, 蔡艳春, 邓国豪, 等. 小电阻接地方式配电系统的运行与保护[J]. 供用电, 2015, 32(6): 30-35.
LIU Yuquan, CAI Yanchun, DENG Guohao, et al. Operation and protection in distribution system with small resistance grounding mode[J]. Distribution & Utilization, 2015, 32(6): 30-35.
- [15] 薛永端, 刘珊, 王艳松, 等. 基于零序电压比率制动的小电阻接地系统接地保护[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(16): 112-117.
XUE Yongduan, LIU Shan, WANG Yansong, et al. Grounding fault protection in low resistance grounding system based on zero-sequence voltage ratio restraint[J]. Automation of Electric Power System, 2016, 40(16): 112-117.
- [16] 胡莠庆. 随机共振微弱特征信号检测理论与方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012: 134-149.
- [17] 史峰, 王辉, 胡斐, 等. MATLAB 智能算法 30 个案例分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011: 95-131.
- [18] 康小宁, 刘鑫, 索南加乐, 等. 基于矩阵束算法的经消弧线圈接地系统故障选线新方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(12): 88-93.
KANG Xiaoning, LIU Xin, SUONAN Jiale, et al. New method for fault line selection in non-solidly grounded system based on matrix pencil method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(12): 88-93.
- [19] 张海申, 何正友, 张钧. 谐振接地系统单相接地故障频谱特征分析[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(6): 79-84.
ZHANG Haishen, HE Zhengyou, ZHANG Jun. Frequency spectrum characteristic analysis of single-phase grounding fault in resonant grounded systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(6): 79-84.
- [20] 柯慧, 顾洁. 电能质量信号的小波阈值去噪[J]. 电力系统及其自动化学报, 2010, 22(2): 103-108.
KE Hui, GU Jie. Wavelet threshold de-noising of power system signals[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2010, 22(2): 103-108.

作者简介:



高杰

高杰(1993—), 男, 浙江温州人, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统自动化、继电保护等 (E-mail: iamgaojie1993@163.com);

程启明(1965—), 男, 江苏盐城人, 教授, 通信作者, 主要研究方向为电力系统自动化、发电过程控制、先进控制及应用等

(E-mail: chengqiming@sina.com);

程尹曼(1990—), 女, 上海人, 硕士研究生, 主要研究方向为新能源发电控制 (E-mail: chengyinman@hotmail.com);

余德清(1992—), 男, 江苏徐州人, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统自动化 (E-mail: 602597365@qq.com);

谭冯忍(1992—), 女, 安徽淮北人, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统自动化 (E-mail: 1520947405@qq.com);

张宇(1992—), 女, 江苏淮安人, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统自动化 (E-mail: 1499021689@qq.com)。

(下转第 203 页 continued on page 203)

Competition game model for local multi-microgrid market based on block chain technology and its solution algorithm

MA Tiannan¹, PENG Lilin², DU Ying¹, GOU Quanfeng¹, WANG Chao¹, GUO Xiaofan³

(1. Economic and Technological Research Institute of State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, China;

2. Sichuan Power Exchange Center Co., Ltd., Chengdu 610041, China;

3. Sichuan Electric Power Design Consulting Co., Ltd., Chengdu 610041, China)

Abstract: Block chain technology as a new distributed database technology has great application potential in the energy filed. As an important component of the energy internet, the research on the competition game of multi participants in the multi-microgrid system is of great significance to the development of energy internet technology. The market demand and profits of microgrid operators, big consumers and distributed aggregators are comprehensively analyzed, and the competition game model for the local multi-microgrid system is proposed based on the block chain technology, which is solved by the IACO (Improved Ant Colony Optimization algorithm). The proposed competition game model and the solution algorithm are simulated and results show that, the optimal electricity price strategy of each period obtained by the proposed model can effectively balance the benefits among market participants, realizing the win-win and coordinated development, and the adaptability and effectiveness of IACO in solving the multi-objective optimization problem based on the block chain technology are verified.

Key words: block chain; multi-microgrid; energy internet; competition game; electricity market; ant colony algorithm; models

.....
(上接第 170 页 continued from page 170)

Faulty line selection method based on quantum genetic bistable system for distribution network

GAO Jie¹, CHENG Qiming¹, CHENG Yinman², YU Deqing¹, TAN Fengren¹, ZHANG Yu¹

(1. Shanghai Key Laboratory Power Station Automation Technology Laboratory, College of Automation Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. College of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Aiming at single phase to ground fault in the distribution network with DG (Distributed Generation), a faulty line selection method based on quantum genetic bistable system for distribution network with DG is proposed. Firstly, the potential function parameters of bistable system are optimized by cross correlation cosine and quantum genetic algorithm, and the optimized bistable system is used to extract transient zero-sequence current of each line in noise background. Then, the normalized energy coefficient of transient zero-sequence current and cosine factor are calculated for each line. Finally, the feature angle is defined according to normalized energy coefficients and cosine factors, the line with feature angle bigger than 90° is judged as the faulty line. A large number of simulation experiments prove that immune to Gauss white noise intensity, fault resistances and fault distance and so on, the proposed method has the feasibility, effectiveness and applicability.

Key words: distributed power generation; distribution network; single-phase ground fault; transient zero-sequence current; faulty line selection; bistable system

附录

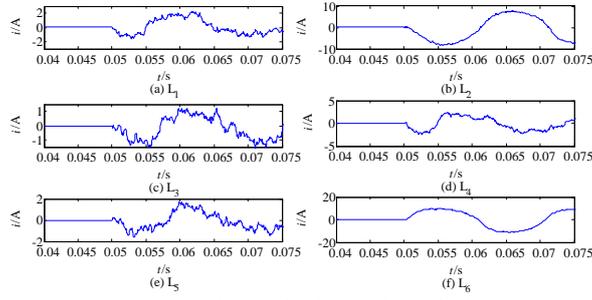


图 A1 本文所提方法的提取电流

Fig.A1 The extraction currents of this paper method

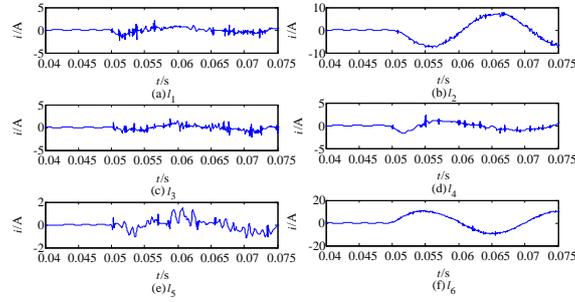


图 A2 小波阈值方法下的提取电流

Fig.A2 The extraction currents of wavelet threshold method

表 A1 不同信噪比的选线结果

Table A1 Fault line detection results in different SNR

故障 线路	故障 电阻	信噪比	θ_n ($n=1,2,3,4,5,6$)	选线 结果
L ₆	500Ω	-1db	[0.96 °, 86.53 °, 0.77 °, 2.00 °, 0.89 °, 105.17 °]	L ₆
		10db	[0.57 °, 76.67 °, 0.39 °, 1.45 °, 0.40 °, 108.23 °]	L ₆
		30db	[0.43 °, 76.95 °, 0.23 °, 1.20 °, 0.23 °, 108.41 °]	L ₆

表 A2 不同故障角的选线结果

Table A2 Fault line detection results in different fault angle

故障 线路	故障 电阻	故障 相角	θ_n ($n=1,2,3,4,5,6$)	选线 结果
L ₅	100Ω	0 °	[0.19 °, 31.64 °, 0.11 °, 0.55 °, 117.92 °, 20.97 °]	L ₅
		30 °	[0.27 °, 18.99 °, 0.11 °, 1.02 °, 124.83 °, 17.21 °]	L ₅
		60 °	[0.54 °, 17.82 °, 0.13 °, 1.71 °, 125.10 °, 16.95 °]	L ₅
		90 °	[1.00 °, 19.83 °, 0.14 °, 1.42 °, 122.49 °, 17.70 °]	L ₅

表 A3 不同消弧线圈补偿度的选线结果

TableA 3 Fault line detection results in arc suppression coil compensation

故障 线路	故障 电阻	消弧线圈 补偿度	θ_n ($n=1,2,3,4,5,6$)	选线 结果
L ₄	100Ω	5%	[0.27 °, 18.92 °, 0.13 °, 123.92 °, 0.13 °, 15.89 °]	L ₄
		8%	[0.87 °, 17.73 °, 0.15 °, 124.74 °, 0.14 °, 15.14 °]	L ₄
		10%	[0.29 °, 19.62 °, 0.14 °, 123.66 °, 0.14 °, 16.08 °]	L ₄

表 A4 不同故障距离的选线结果

TableA 4 Fault line detection results in different fault distance

故障 线路	故障 电阻	故障 距离	θ_n ($n=1,2,3,4,5,6$)	选线 结果
L ₆	500Ω	5km	[0.87 °, 74.16 °, 0.71 °, 2.02 °, 0.57 °, 110.37 °]	L ₆
		7km	[0.90 °, 81.02 °, 0.61 °, 2.01 °, 0.65 °, 107.83 °]	L ₆
		12km	[0.88 °, 83.20 °, 0.74 °, 2.35 °, 0.46 °, 105.57 °]	L ₆

表 A5 电弧故障的选线结果

Table A5 Fault line detection results in arc fault

故障 线路	故障 相角	弧道 电阻	θ_n ($n=1,2,3,4,5,6$)	选线 结果
L ₂	0 °	50Ω	[0.15 °, 122.18 °, 0.07 °, 0.54 °, 0.08 °, 21.53 °]	L ₂
		200Ω	[0.24 °, 119.98 °, 0.13 °, 0.72 °, 0.14 °, 22.34 °]	L ₂
		500Ω	[0.43 °, 120.42 °, 0.32 °, 1.54 °, 0.41 °, 28.20 °]	L ₂