

基于特征余弦差分的微电网故障诊断研究

王晓程, 林洋, 何珠岭

(国网内蒙古东部电力有限公司, 呼和浩特 010010)

摘要: 针对微电网线路故障诊断问题, 通过电流和电压故障分量求解椭圆方程参数来提取故障特征, 利用椭圆方程和最小二乘法获取特征余弦来描述电压和电流的联合行为; 使用 5 个采样点来确定用于获取总线电压和电流之间极性关系的椭圆参数; 分析微电网的结构和使用特征余弦, 讨论故障发生在不同位置时特征余弦的变化; 采用 ± 1 定义总线的特征方向, 结合特征余弦得到差分特征方向来检测故障区段位置, 避免不同微电网运行方式的阈值选择。

关键词: 微电网; 特征余弦; 椭圆方程; 故障定位

Research on Fault Diagnosis of Microgrid based on Characteristic Cosine Difference

Wang Xiaocheng, Lin Yang, He Zhuling

(State Grid Inner Mongolia Eastern Power Company, Hohhot 010010, China)

Abstract: For the fault diagnosis of microgrid lines, the fault features are extracted by solving the parameters of elliptic equation by current and voltage fault components, and the joint behavior of voltage and current is described by obtaining characteristic cosine by elliptic equation and least square method. Five sampling points are used to determine the ellipse parameters used to obtain the polarity relationship between bus voltage and current. The structure and characteristic cosine of microgrid are analyzed, and the change of characteristic cosine when the fault occurs in different position is discussed. The bus characteristic direction is defined by ± 1 , and the differential characteristic direction is obtained by combining the characteristic cosine to detect the fault section position, so as to avoid the threshold selection of different microgrid operation modes.

Keywords: microgrid; characteristic cosine; elliptic equation; fault location

0 引言

由于气候问题、科技发展和政府激励措施, 微电网已逐渐实现并网供电。微电网包括各种类型的分布式发电(DG), 如太阳能发电^[1]、风能发电^[2]和地热发电^[3]等。微电网的使用可以减少电力传输损耗、温室气体排放, 并提高电力系统可靠性。同样, 微电网面临许多技术难题, 如电压和频率控制^[4]、稳定性和电能质量^[5]等。微电网的运行、控制和保护不同于传统电网。文献[6]在建立微电网动态安全模型的基础上, 提出了微电网保护的离线分析、在线计算和实时保护三阶段方法。文献[7]采用滞后控制和最大电流控制(RMS)来限制故障电流, 使得故障电流具有五次谐波的比例, 从而建立保护策略, 但该方法仅适用于孤岛模式微电网。文献[8]研究了低压微电网的保护问题, 阐述了低压微电网的保护概念, 结合电压和频率继电器作为共耦继电器的支点, 利用方向过流继电器进行馈线保护。文献[9]采用了正序分量和负序分量等顺序分量进行设计, 但由于多个整定值的存在, 使得继电保护的协调变得更加复杂。文献[10]提出了一种基于暂态电压信

号最大振荡幅值的故障测距方法, 但该方法没有考虑三相微电网。文献[11]采用基于dq小波包变换的数字保护技术研究了微电网系统各部分的瞬态扰动。文献[12]提出了基于改进型因果时序网络的微电网故障诊断方法, 通过微电网线路保护与断路器间的时序逻辑关系, 辨别微电网故障警报信息的正误, 对微电网进行故障诊断确定故障过程。

与其他微电网保护方法相比, 本文通过电流和电压故障分量求解椭圆方程参数来提取故障特征, 只需使用 5 个采样点来确定用于获取总线电压和电流之间极性关系的椭圆参数。在检测准则上, 采用 ± 1 定义总线的特征方向, 避免了不同微电网运行方式的阈值选择。

1 总线单相特征余弦

1.1 数学模型

在 t 时刻, 总线单相的电压和电流信号可以表示为:

$$u(t) = U_0 \sin(\omega t) \quad (1)$$

$$i(t) = I_0 \sin(\omega t - \varphi) \quad (2)$$

其中: 角度 φ 是 $i(t)$ 和 $u(t)$ 之间的延迟。 U_0 和 I_0 分别是 $u(t)$ 和 $i(t)$ 的峰值。 ω 是角速度, $\omega = 2\pi f$ 。在我国的电力系统中, $f = 50$ Hz。 $\cos(\varphi)$ 定义为特征余弦。

对于总线, 不同条件下同一相位电压和电流正弦信号的联合行为, 如图 1 所示。其中, 图 1(a) 中, $U_0 = 1, I_0$

收稿日期: 2019-12-09; 修回日期: 2020-01-21。

作者简介: 王晓程(1973-), 男, 内蒙古赤峰人, 硕士, 高级工程师, 主要从事智能变电站建设运维检修管理方向的研究。

= 1; 图 1 (b) 中, $U_0 = 1, \varphi = 70^\circ$ 。

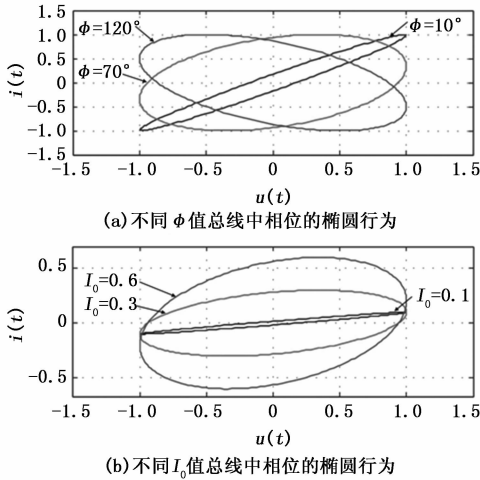


图 1 不同情况下总线中相位的椭圆行为

该联合行为可以用圆锥曲线的数学方程来模拟。则总线椭圆方程的笛卡尔形式可以定义为:

$$x^2(t) - 2\cos(\varphi)x(t)y(t) + y^2(t) - \sin^2(\varphi) = 0 \quad (3)$$

其中:

$$\sin^2(\omega t) + \cos^2(\omega t) = 1 \quad (4)$$

$$x(t) = \frac{u(t)}{U_0} = \sin(\omega t) \quad (5)$$

$$y(t) = \frac{i(t)}{I_0} = \sin(\omega t - \varphi) \quad (6)$$

对于任意 U_0 和 I_0 , 椭圆方程为:

$$I_0^2 u^2(t) - 2U_0 I_0 \cos(\varphi) u(t) i(t) - U_0^2 i^2(t) - U_0^2 I_0^2 \sin^2(\varphi) = 0 \quad (7)$$

因此, 对于总线而言, 利用公式 (7) 的几何特性可以监测每个相的电压和电流信号行为, 并识别出潜在故障发生的时刻。因此, 本文提出将椭圆参数作为判断故障区段位置的指标。

1.2 特征余弦

根据文献 [13], 在 R^2 中定义的椭圆部分代表一组点, 其坐标满足公式 (8), 公式 (8) 的形式等于公式 (7), 并且公式 (8) 可以视为得到公式 (7) 参数的拟合模型:

$$ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey + f = 0 \quad (8)$$

其中: 参数 a 或 b 或 c 不同时为 0。

公式 (7) 和公式 (8) 都可以用矩阵形式改写为:

$$f(x) = \alpha x + 1 \quad (9)$$

其中:

$$\begin{cases} \alpha = [a & b & c & d & e] \\ x = [u^2(t) & u(t) & i(t) & i^2(t) & u(t) & i(t)] \end{cases} \quad (10)$$

基于最小二乘法原理^[14], 能量函数 J_a 可以表示为:

$$J_a(a, \dots, e) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n [f(x_i) - 0]^2 \quad (11)$$

因此, 将参数估计问题转化为求解 J_a 的局部极小值问

题。利用 Levenberg - Marquardt 算法^[15] 得到公式 (7) 的参数:

$$a = a^* = [a^* \quad b^* \quad c^* \quad d^* \quad e^*] \quad (12)$$

特征余弦 $\cos(\varphi)$ 表示电压和电流之间的相位关系, 在微电网正常运行的情况下, 即使在负载不平衡的条件时, 每个相位的 $\cos(\varphi)$ 也是常数。则特征余弦 $\cos(\varphi)$ 可以表示为:

$$\cos(\varphi) = -\frac{b^*}{2\sqrt{a^*}\sqrt{c^*}} \quad (13)$$

2 特征余弦

2.1 微电网拓扑

基于 CERTS 技术^[16] 的微电网模型拓扑结构改进的微电网, 如图 2 所示。其中, PCC 为公共连接点。

该微电网使用 10/0.4 kV 变压器连接到配电网。每个分布式发电 (DG) 由改进的下垂控制器控制。每个负载容量, 如表 1 所示。

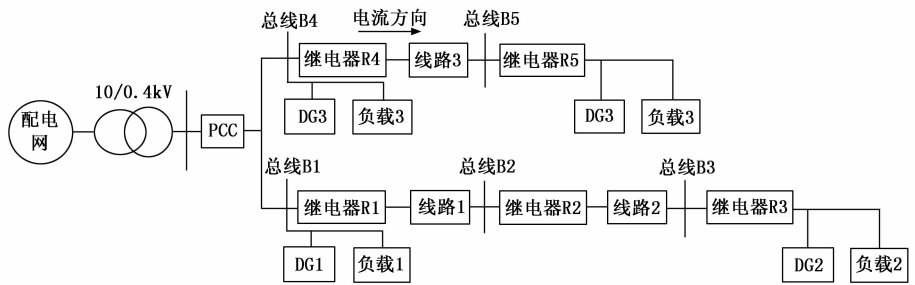


图 2 微电网模型拓扑结构

表 1 负载容量

负载	有功功率/kW	无功功率/kVar
负载 1	45	15
负载 2	45	22.5
负载 3	35	10
负载 4	45	15

系统其他参数为: 电力电子器件为 IGBT, DG 容量均为 80 kVA, 开关频率为 6 kHz, 直流电压为 800 V, 线路电阻为 0.642 Ω /km, 线路电感为 0.083 H/km, 线路 1、线路 2 和线路 3 的长度分别为 0.3 km、0.2 km、0.5 km。

2.2 利用原因

根据文献 [17], 每个 DG 可采用故障限流策略。例如, 当微电网在 0.2 s 时刻, 三线接地 (LLL) 故障或单线接地 (LG) 故障的故障位置为线路 2。图 3 可以表明故障限流策略在 0.21 s 后, 可以有效地限制每个 DG 故障电流为额定电流的 2 倍, 并且该策略可以抑制谐波, 使输出电流和电压的频率等于 50 Hz。因此, 本文利用特征余弦来检测线路故障。

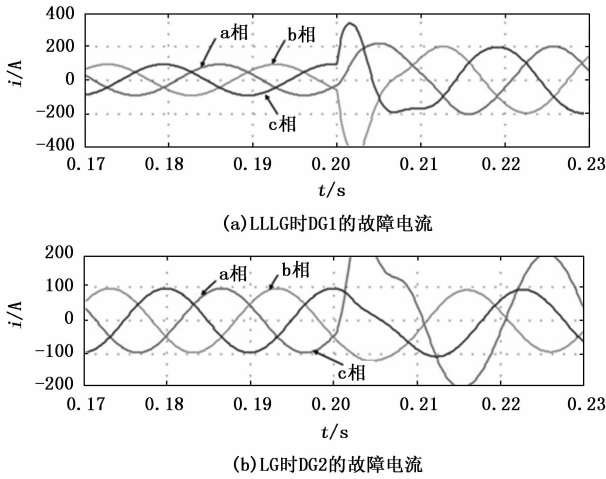


图 3 DG 的故障限流策略

3 微电网故障特征分析

3.1 线路 1 故障

本文在文献 [18] 分析方法的基础上, 重点研究电流方向。当图 2 的线路 1 发生短路故障时, B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_4 和 B_5 为总线。以 B_1 和 B_2 为例, B_1 和 B_2 的电流方向适用于孤岛模式和并网模式, 如图 4 所示。

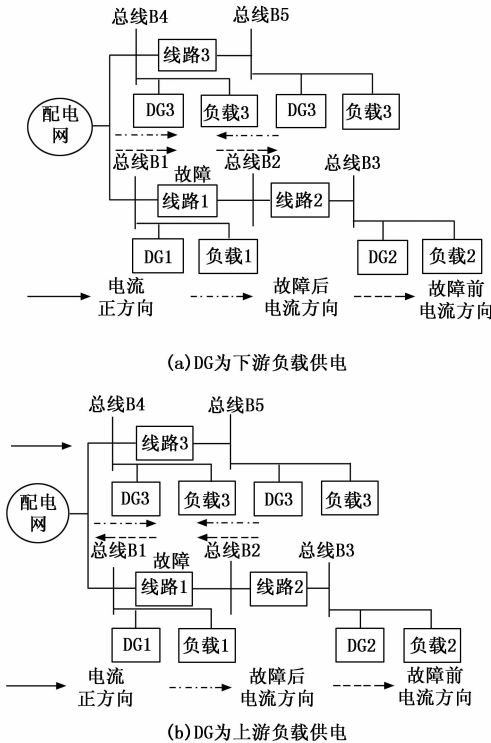


图 4 当线路 1 发生故障时, B_1 和 B_2 的电流方向

在图 4 (a) 中, 当 DG 为下游负载供电时, 由于微电网中的负载通常是感性负载, 则相位 φ_1 和 φ_2 可以表示为:

$$\begin{cases} \varphi_1 = \arg(\dot{U}_1) - \arg(\dot{I}_1) > 0^\circ \\ \varphi_2 = \arg(\dot{U}_2) - \arg(\dot{I}_2) > 0^\circ \end{cases} \quad (14)$$

其中: \dot{U}_1 和 \dot{U}_2 是 B_1 和 B_2 的电压。 \dot{I}_1 和 \dot{I}_2 是 B_1 和 B_2 的电流。 $\arg(\dot{U}_1)$ 是 B_1 的电压相位。 $\arg(\dot{I}_1)$ 是 B_1 的电流相位。

故障发生后, 由于故障点接地阻抗明显小于负载阻抗^[19], 则电流方向上, B_1 和 B_2 均为总线到故障点方向。此外, B_1 和 B_2 的电压相位没有改变。当故障发生在线路 1 时, $\cos(\varphi_1^f)$ 为正, $\cos(\varphi_2^f)$ 为负:

$$\begin{cases} \varphi_1^f = \arg(\dot{U}_1^f) - \arg(\dot{I}_1^f) \approx \arg(\dot{U}_1) - \arg(\dot{I}_1) > 0^\circ \\ \varphi_2^f = \arg(\dot{U}_2^f) - \arg(\dot{I}_2^f) \approx \arg(\dot{U}_2) - \arg(\dot{I}_2) - 180^\circ < -90^\circ \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} \cos(\varphi_1^f) = \cos(\arg(\dot{U}_1) - \arg(\dot{I}_1)) > 0 \\ \cos(\varphi_2^f) = \cos(\arg(\dot{U}_2) - \arg(\dot{I}_2) - 180^\circ) > 0 \end{cases} \quad (16)$$

其中: φ_1^f 和 φ_2^f 为 B_1 和 B_2 在故障后的相位。

同理, 当 DG 向上游负荷供电时, B_1 和 B_2 处的电流方向如图 4 (b) 所示。通过分析, 当故障发生在线路 1 时, $\cos(\varphi_1^f)$ 为正, $\cos(\varphi_2^f)$ 为负。

3.2 线路 2 故障

当故障发生在图 2 所示的线路 2 时, B_1 和 B_2 的电流方向如图 5 所示。

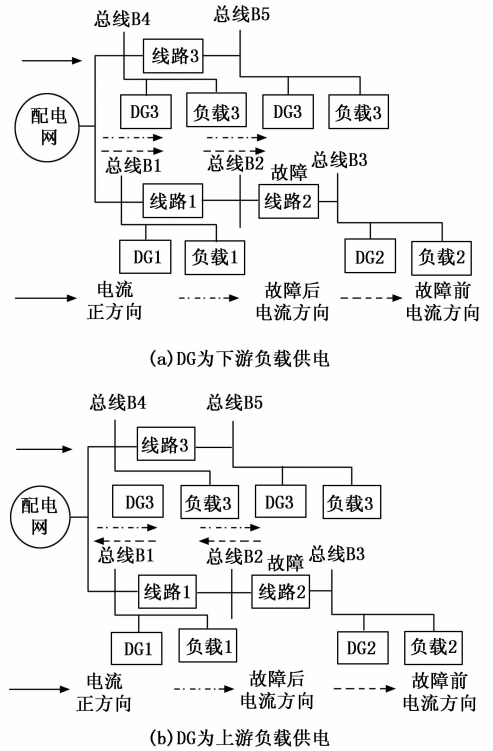


图 5 当线路 2 发生故障时, B_1 和 B_2 的电流方向

当 DG 为图 5 (a) 所示的下游负载供电且故障发生在线路 2 时, 由于负载阻抗大于接地阻抗^[20], 所以电流方向、 B_1 和 B_2 的电流方向都是从总线到故障点方向。 $\cos(\varphi_1^f)$ 和 $\cos(\varphi_2^f)$ 可以表示为:

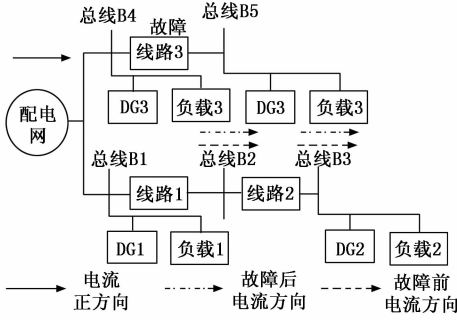
$$\begin{cases} \cos(\varphi_1^f) \approx \cos(\arg(\bar{U}_1) - \arg(\bar{I}_1)) > 0 \\ \cos(\varphi_2^f) \approx \cos(\arg(\bar{U}_2) - \arg(\bar{I}_2)) > 0 \end{cases} \quad (17)$$

同理, 如果 DG 为图 5 (b) 所示的下游负载供电, 则

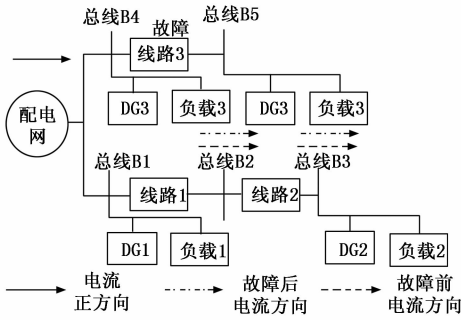
线路 2 发生故障时, $\cos(\varphi_1^f)$ 和 $\cos(\varphi_2^f)$ 均为正。

3.3 线路 3 故障

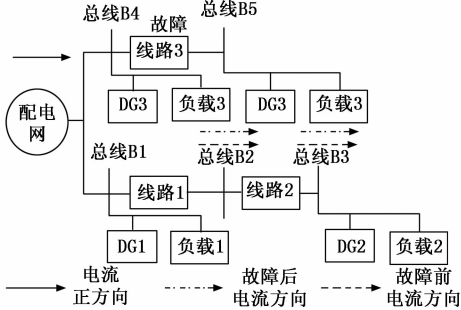
当故障发生在图 2 所示的线路 3 时, B_1 和 B_2 的电流方向, 如图 6 所示。



(a) 故障点对 B2 的影响较大, DG 为下游负载供电



(b) 故障点对 B2 的影响较小, DG 为下游负载供电



(c) 故障点对 B2 的影响较小, DG 为上游负载供电

图 6 当线路 3 发生故障时, B_1 和 B_2 的电流方向

由于故障点到 B_2 的距离相对较远, 所以有以下两种情况:

1) 接地阻抗较小, 即故障点对 B_2 的影响较大。 B_1 和 B_2 的电流方向都是从总线到故障点方向, 这些方向与故障前相反, 如图 6 (a) 所示。其特征余弦均为负:

$$\begin{cases} \cos(\varphi_1^f) \approx \cos(\arg(\bar{U}_1) - \arg(\bar{I}_1) - 180^\circ) < 0 \\ \cos(\varphi_2^f) \approx \cos(\arg(\bar{U}_2) - \arg(\bar{I}_2) - 180^\circ) < 0 \end{cases} \quad (18)$$

2) 当故障点对 B_2 的影响较小时, 可以维持 B_1 和 B_2 的电流方向, 与图 6 (b) 所示的故障方向相同, $\cos(\varphi_1^f)$ 和 $\cos(\varphi_2^f)$ 均为正。

同样, 如果 DG 为图 6 (c) 所示的上游负载供电, 根

据故障点对 B_2 的影响, 也存在两种情况。 $\cos(\varphi_1^f)$ 和 $\cos(\varphi_2^f)$ 在这两种情况下均为负。

综上所述, 无论总线的初始电流方向如何变化, 当故障发生在 B_1 和 B_2 之间的区段时, $\cos(\varphi_1^f)$ 为正, $\cos(\varphi_2^f)$ 为负。此外, 在 B_1 和 B_2 之间的区域不发生故障的情况有两种: 1) $\cos(\varphi_1^f)$ 和 $\cos(\varphi_2^f)$ 均为正; 2) $\cos(\varphi_1^f)$ 和 $\cos(\varphi_2^f)$ 均为负。这些可以在表 2 中清楚地显示, 其中“+”是正数, “-”是负数。

表 2 B_1 和 B_2 的特征余弦方向

故障区段	B_1	B_2
线路 1	+	-
线路 2	+	+
	-	-
线路 3	+	+
	-	-

4 保护方法

为了减少使用继电器的数量, 本文考虑到总线末端的继电器, 而不是线路末端的继电器。然而, 为了隔离故障, 需要在线路末端安装断路器。本文提出了利用特征余弦函数获取各总线特征方向 (D) 的方法:

步骤 1: 在 B_n 和 B_{n+1} 取 $u_n^w(t)$, $u_{n+1}^w(t)$, $i_n^w(t)$, $i_{n+1}^w(t)$ 。 $u_n^w(t)$ 和 $i_n^w(t)$ 是 B_n 在 w 相的归一化电压和电流, $u_{n+1}^w(t)$ 和 $i_{n+1}^w(t)$ 是 B_{n+1} 在 w 相的归一化电压和电流, w 是 a 或 b 或 c , n 是总线数量, n 等于 1、2 和 4。

步骤 2: 对于 B_n , 根据 Levenberg-Marquardt 算法, 可以计算出总线椭圆方程 a_n^w 的参数。 a_n^w 可以表示电压和电流信号的联合行为:

$$a_n^w = [a_n^w \quad b_n^w \quad c_n^w \quad d_n^w \quad e_n^w] \quad (19)$$

步骤 3: 同理, 对于 B_{n+1} , 可以得到线性椭圆方程 a_{n+1}^w 的参数:

$$a_{n+1}^w = [a_{n+1}^w \quad b_{n+1}^w \quad c_{n+1}^w \quad d_{n+1}^w \quad e_{n+1}^w] \quad (20)$$

步骤 4: 计算 B_n 和 B_{n+1} 的特征余弦 $\cos(\varphi_n^w)$ 和 $\cos(\varphi_{n+1}^w)$:

$$\cos(\varphi_n^w) = -\frac{b_n^w}{2\sqrt{a_n^w}\sqrt{c_n^w}} \quad (21)$$

$$\cos(\varphi_{n+1}^w) = -\frac{b_{n+1}^w}{2\sqrt{a_{n+1}^w}\sqrt{c_{n+1}^w}} \quad (22)$$

步骤 5: D_n^w 、 D_{n+1}^w 和 D_{cn}^w 可以由下列方程得到。 D_n^w 和 D_{n+1}^w 表示总线 B_n 和 B_{n+1} 故障电流特征方向, D_{cn}^w 是差分方向:

$$D_n^w = \begin{cases} 1, & \cos(\varphi_n^w) > 0 \\ -1, & \cos(\varphi_n^w) < 0 \end{cases} \quad (23)$$

$$D_{n+1}^w = \begin{cases} 1, & \cos(\varphi_{n+1}^w) > 0 \\ -1, & \cos(\varphi_{n+1}^w) < 0 \end{cases} \quad (24)$$

$$D_{cn}^w = D_{n+1}^w - D_n^w \quad (25)$$

步骤 6: 当 $D_{cn}^w < 0$ 时, 则 B_n 与 B_{n+1} 之间的区段判断为

故障区段; 当 $D_{m1}^w \geq 0$ 时, 则 B_n 与 B_{n+1} 之间的区段判断为正常区段。以 B_1 和 B_2 为例, 本文提出的方法的步骤如图 7 所示。

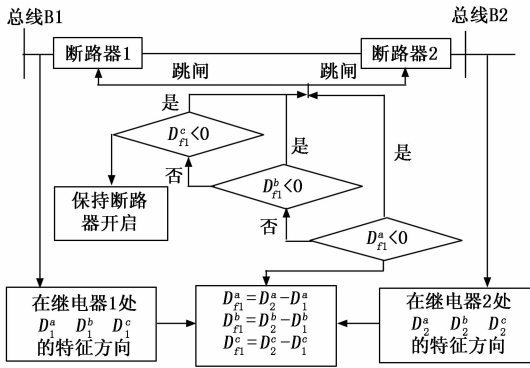


图 7 本文方法的步骤

5 仿真结果

5.1 参数设置

为了验证本文提出的方法的有效性, 通过 Matlab/Simulink 软件对图 2 所示的微电网进行了不同故障条件的仿真。

- 故障电阻 (R_f): 0.01、0.1、0.2、0.3、0.5、1、5、10。
- 不同故障类型 (F_i): 单线接地 (LG)、双线接地 (LLG)、单线接地 (LL) 和三线接地 (LLL), 其中 LG (a) 表示故障相为 a 相的单线接地。
- 故障区段 (F_L): 线路 1、线路 2 和线路 3。
- 不同的微电网运行模式 (O_m): 孤岛模式和并网模式。
- 负荷不平衡: 负荷的各相容量发生变化。
- 噪声影响: 信噪比 (SNR) 设置为 50 dB、20 dB、5 dB。

5.2 不同的接地电阻

当图 2 所示的微电网在孤岛模式下运行时, 假设 LG 在 $t = 0.2$ s 时的线路 1 发生故障, 即故障区段位于 B_1 和 B_2 之间的标记 $B_1 \sim B_2$ 处。故障情况包括: 故障相为 a 相, 接地电阻分别设置为 0.01 Ω 、0.5 Ω 、0.1 Ω 、2 Ω 和 10 Ω 。各总线的特征余弦和实现本文方法后的判断结果, 如表 3 所示。其中, P 为相序。

以接地电阻 0.5 Ω 为例, 图 8 给出了 B_1 和 B_2 的电压和电流, 图 9 给出了 B_1 和 B_2 各相的总线椭圆。图 8 说明了 B_1 的故障相电压方向与 B_2 相同, 而 B_1 的故障相电流方向与 B_2 相反。

对于 a 相, 根据表 3 和本文的方法, 从 $B_1 \sim B_5$ 的特征余弦分别为 0.999、-1.000、-0.999、-0.997 和 -0.997。因此, 从 B_1 到 B_5 的特征方向分别是 1、-1、-1、-1 和 -1, 即它们的差分方向分别是 -2、0、0、0、0。同样, 对于 b 相和 c 相, 它们的差分方向都是 0。因此, 故障区段在 B_1 和 B_2 之间, 这一结果与实际故障一致。从表

表 3 各总线的特征余弦及不同接地电阻的结果

R_f / Ω	P	$[B_1, B_2, B_3, B_4, B_5]$	每个 P 的结果	最终 结果
0.01	a	[0.954, -0.990, -0.982, -0.859, -0.729]	$B_1 \sim B_2$	$B_1 \sim B_2$
	b	[0.998, 0.999, 0.999, -1.007, -1.009]	正常	
	c	[0.999, 0.999, 0.999, -0.997, -0.995]	正常	
0.1	a	[0.961, -0.986, -0.978, -0.904, 0.797]	$B_1 \sim B_2$	$B_1 \sim B_2$
	b	[0.998, 0.998, 0.998, -0.991, -0.987]	正常	
	c	[0.998, 0.998, 0.999, -0.992, -0.989]	正常	
0.5	a	[0.999, -1.000, -0.999, -0.997, -0.997]	$B_1 \sim B_2$	$B_1 \sim B_2$
	b	[-0.891, -0.894, -0.896, 0.720, 0.699]	正常	
	c	[-0.958, -0.960, -0.962, 0.925, 0.919]	正常	
2	a	[0.936, -0.979, -0.960, -0.897, -0.767]	$B_1 \sim B_2$	$B_1 \sim B_2$
	b	[0.999, 0.999, 1.000, -0.994, -0.993]	正常	
	c	[1.000, 1.000, 1.001, -0.996, -0.994]	正常	
10	a	[0.927, -0.974, -0.952, -0.888, -0.752]	$B_1 \sim B_2$	$B_1 \sim B_2$
	b	[0.999, 0.999, 0.999, -0.995, -0.993]	正常	
	c	[0.999, 0.999, 1.000, -0.998, -0.997]	正常	

3 可以看出, 本文的方法能够有效地检测出不同接地电阻下的故障部分。

5.3 不同的故障类型

当微电网在孤岛模式下运行时, 线路 1 在 $t = 0.2$ s 时会出现不同类型的故障, 包括 LG (b)、LLG (ab)、LL (bc) 和 LLLG, 接地电阻为 0.1 Ω , 即故障区段为 $B_1 \sim B_2$ 。各总线的特征余弦和判断结果, 如表 4 所示。结果表明, 该方法不受故障类型的影响。

表 4 各总线的特征余弦及不同故障类型的判断结果

F_i	P	$[B_1, B_2, B_3, B_4, B_5]$	每个 P 的结果	最终 结果
LG (b)	a	[1.003, 1.003, 1.003, -1.008, -1.012]	正常	$B_1 \sim B_2$
	b	[0.928, -0.915, -0.871, -1.100, -1.084]	$B_1 \sim B_2$	
	c	[1.002, 1.002, 1.002, -0.991, -0.987]	$B_1 \sim B_2$	
LLG (ab)	a	[0.957, -0.946, -0.915, -0.994, -0.970]	$B_1 \sim B_2$	$B_1 \sim B_2$
	b	[0.672, -0.508, -0.380, -0.829, -0.614]	$B_1 \sim B_2$	
	c	[0.998, 0.997, 0.997, 1.004, 1.006]	正常	
LL (bc)	a	[0.401, 0.631, 0.715, 0.113, 0.897]	正常	$B_1 \sim B_2$
	b	[0.953, -0.941, -0.958, -0.977, -0.900]	$B_1 \sim B_2$	
	c	[0.956, -0.943, -0.957, -0.978, -0.909]	$B_1 \sim B_2$	
LLL	a	[0.836, -0.636, -0.473, -0.949, -0.869]	$B_1 \sim B_2$	$B_1 \sim B_2$
	b	[0.609, -0.696, -0.497, -0.852, -0.642]	$B_1 \sim B_2$	
	c	[0.999, -0.866, -0.770, -1.040, -1.010]	$B_1 \sim B_2$	

5.4 性能比较

本文将所提出的方法与文献 [12] 采用的基于改进型因果时序网络的微电网故障诊断方法进行比较。当微电网在孤岛模式下运行时, 线路 1 在 $t = 0.2$ s 时会出现不同类型的故障, 包括 LG (b)、LLG (ab)、LL (bc) 和 LLLG, 接地电阻为 0.1 Ω , 即故障区段为 $B_1 \sim B_2$ 。两种方法对微电网不同故障类型诊断用时对比, 如表 5 所示。

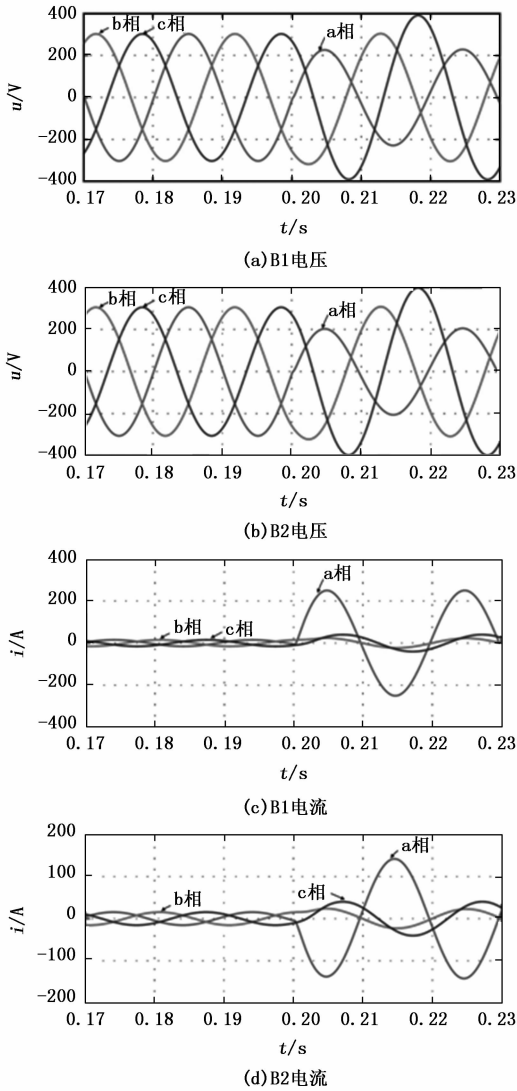


图 8 当线路 1 发生故障时, B₁ 和 B₂ 的电压和电流

表 5 不同故障类型诊断用时对比 ms

方法	LG(b)				LLG(ab)			
	a	b	c	平均用时	a	b	c	平均用时
本文方法	10.1	79.3	82.7	57.4	126.4	113.6	11.1	83.7
改进型因果时序网络 ^[12]	40.2	176.4	196.4	137.7	249.8	255.3	279.4	261.5
方法	LL(bc)				LLL			
	a	b	c	平均用时	a	b	c	平均用时
本文方法	15.4	147.5	156.4	106.4	154.6	169.1	175.1	166.3
改进型因果时序网络 ^[12]	86.7	317.2	364.2	256.0	466.1	497.5	514.8	492.8

由表 5 的结果表明, 本文所提方法计算不同故障类型诊断用时, 对于无故障相的检测用时较小 (例如, LG (b) 中的 a 相、LLG (ab) 中的 c 相、LL (bc) 中的 a 相), 这是由于本文的特征余弦差分方法仅通过电流和电压故障分

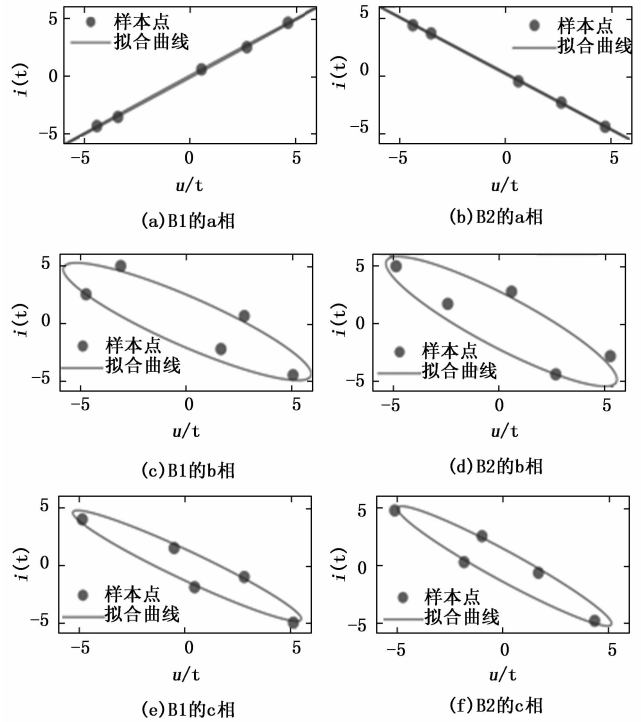


图 9 B₁ 和 B₂ 不同相位的总线椭圆

量来提取故障特征, 当检测到无故障相电流时, 只需使用 5 个采样点在极短的时间内完成椭圆参数并确定总线的特征方向, 而不需要再进行阈值选择。文献 [12] 基于改进型因果时序网络方法在检测到无故障相电流的同时, 还需对电流进行时序分解并计算前后时序的因果关系。因此, 对于无故障相的检测用时过程中, 本文方法具有明显优势。

同时, 本文所提方法计算不同故障类型的不同相诊断平均用时仅为文献 [12] 基于改进型因果时序网络方法的 35% 左右, 性能表现更好, 这对于快速诊断微电网故障具有实践意义。

6 结束语

本文提出了一种利用差分方向检测故障区段位置的保护方法, 利用各相的电压和电流来计算差分方向。当微电网运行模式改变且负载不平衡时, 不需要改变阈值来检测故障区域的位置。最后, 利用不同的接地电阻和故障类型验证了所提方法的有效性。

参考文献:

[1] 邢毓华, 刘 兴, 程绍谦. 基于太阳能充电站中风光火多目标优化管理问题的研究 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (7): 174-179.

[2] 杨 灿, 王 勇. 基于灰狼算法的分布式混合能源优化配置方法 [J]. 微型电脑应用, 2018, 34 (12): 11-14.

[3] Pambudi N A. Geothermal power generation in Indonesia, a country within the ring of fire: current status, future development and policy [J]. Renewable and Sustainable Energy Re-

views, 2018, 81 (2): 2893–2901.

- [4] 李季, 楚冰清, 余健明. 基于 VSG 的微电网二次调频控制策略 [J]. 信息技术, 2019, 43 (11): 62–66.
- [5] 朱义贤, 刘路登, 陈存林, 等. 基于状态估计的微电网功率平衡自适应控制 [J]. 控制工程, 2019, 26 (11): 2152–2158.
- [6] Lin H, Sun K, Tan Z H, et al. Adaptive protection combined with machine learning for microgrids [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2019, 13 (6): 770–779.
- [7] 吴胜聪, 吴峰, 邹宇, 等. 基于电能质量监测的分布式电源优化设计方案 [J]. 自动化应用, 2019 (7): 95–98.
- [8] 翟盼盼, 苟军年, 杨剑锋. 基于自适应下垂法的有功功率均分控制 [J]. 电测与仪表, 2019, 56 (10): 105–110.
- [9] Muda H, Jena P. Superimposed adaptive sequence current based microgrid protection: a new technique [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 32 (2): 757–767.
- [10] Mirsaedi S, Said D M, Mustafa M W, et al. A protection strategy for micro-grids based on positive-sequence impedance [J]. Distributed Generation & Alternative Energy Journal, 2016, 31 (3): 7–32.
- [11] Saleh S A, Ahshan R, Abu-Khaizaran M S, et al. Implementing and Testing d-q WPT-Based Digital Protection for Microgrid Systems [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2013, 50 (3): 2173–2185.
- [12] 杨帆, 张琰骏. 基于改进型因果时序网络的微电网故障诊断方法 [J]. 国外电子测量技术, 2019, 38 (4): 28–33.
- [13] Agundis-Tinajero G, Pena Gallardo R, Segundo-Ramirez J, et al. Performance assessment of shooting methods using par-

allel cloud computing [J]. COMPEL—The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, 2019, 38 (2): 915–926.

- [14] 陈卫东, 梁朔, 肖园园, 等. 基于模糊最小二乘支持向量机的微电网群状态评估方法 [J]. 电力系统自动化, 2019, 43 (2): 76–82.
- [15] 何琨, 严正, 徐潇源, 等. 基于 Sobol' 法的孤岛微电网潮流全局灵敏度分析 [J]. 电力系统自动化, 2018, 42 (14): 99–106.
- [16] Manohar M, Koley E, Ghosh S, et al. Spatio-temporal information based protection scheme for PV integrated microgrid under solar irradiance intermittency using deep convolutional neural network [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 116: 105–116.
- [17] 李松峰, 牟龙华, 郭文明, 等. 基于虚拟阻抗的恒压恒频微电源的故障控制策略 [J]. 电工技术学报, 2018, 33 (3): 581–590.
- [18] Yehia D M, Mansour D E A. Modeling and analysis of superconducting fault current limiter for system integration of battery banks [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2018, 28 (4): 1–6.
- [19] Gao J, Wang X, Yang F. Current-limiting strategy based on PR controller and active power filter for droop controlled microgrid [J]. The Journal of Engineering, 2019 (16): 2289–2295.
- [20] 张伟, 刘晓康, 贾霖. 微电网接口逆变器故障特性研究与分析 [J]. 电气应用, 2018, 37 (23): 94–100.

(上接第 12 页)

5) 系统耦合性低。载荷自动化测试系统设计为高内聚, 低耦合。OCOE、数传 SCOE 和载荷 SCOE 分别独立, 具有独立的子功能, 并且与其他模块联系最少且接口足够简单, 这样, 一旦某一个模块出现问题或者更改, 不影响其他模块的功能。

5 结束语

目前, 载荷自动化测试系统已经成功应用到某型号小卫星测试的全周期, 对于减少测试人员负担, 提高载荷测试工作效率发挥了重要作用。但是, 由于目前小卫星种类繁多, 需要有不同的载荷处理终端, 所以此种载荷自动化测试系统通用化比较低, 只能应用到某一类型的载荷自动化测试中; 另一方面, 在应用过程中, 发现一旦某个环节软件出现问题, 就需要对整个系统进行重新连接, 以便确保信道畅通, 还缺少保持信道稳定的必要手段, 后续需要对此展开专门的研究, 进一步推动小卫星载荷自动化测试的进程。

参考文献:

- [1] 王庆成. 航天器电测技术 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2007.

- [2] 徐福祥. 卫星工程概论 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 2009.
- [3] Jones H. Integrated systems testing of spacecraft [A]. The 37th International Conference on Environmental Systems (ICES) [C]. Chicago: Aviation Industry Development Research, 2007.
- [4] 谭维炽, 胡金刚. 航天器系统工程 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2009.
- [5] 周一鸣. 探究美国 SpaceX 公司的发展与成功 [J]. 国际太空, 2014 (9): 27–29.
- [6] 王庆成, 艾晓然. 一种通用的卫星综合测试系统研究 [A]. 中国宇航学会飞行器总体专业委员会 2004 年学术研讨会论文集 [C]. 北京: 中国宇航学会, 2005: 1022–1033.
- [7] 张勇, 王堃, 王强, 等. 基于实时数据库的卫星测试平台的设计与实现 [J]. 计算机工程与设计, 2009, 30 (2): 336–337.
- [8] 何铭俊, 陆文高, 曾鸿, 等. 一种卫星任务解译闭环仿真验证系统的设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (1): 271–274.
- [9] 兰超, 王婧琼. BIT 技术在星载电子设备的应用 [J]. 空间控制技术与应用, 2015, 41 (1): 50–54.
- [10] 曾声奎, Pecht M G, 吴际. 故障预测与健康 PHM 技术的现状与发展 [J]. 航空学报, 2005, 26 (5): 26–32.