

基于电压不平衡度正反馈的孤岛检测新方法

孙 博,郑建勇,梅 军

(东南大学 电气工程学院,江苏 南京 210096)

摘要: 为了实现孤岛无盲区与非破坏性检测,提出一种基于电压不平衡度正反馈的孤岛检测方法。当孤岛发生后,正反馈回路将导致公共连接点(PCC)的电压不平衡度呈放大趋势,通过检测 PCC 的电压不平衡度即可判断孤岛的发生。为了避免伪孤岛情况下的误操作,设定了伪孤岛的判定条件,引入判定时长,当电压不平衡度超过预设阈值 ε^* 的时间超过该判定时长时,则可确定孤岛发生。仿真结果验证了所提方法能够在 IEEE Std.1547 标准所定义的最恶劣情况下快速、有效地检测出孤岛的发生,同时能够有效避免伪孤岛情况下的误操作。

关键词: 孤岛检测; 正反馈; 有功电流; 电压不平衡度; 伪孤岛

中图分类号: TM 71

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.02.020

0 引言

随着分布式发电由独立发电模式逐渐转变为并网发电模式,孤岛问题也日益突显。所谓的孤岛效应是指当出现事故、故障或是维修停电等其他原因而造成供电系统不能进行工作时,分布式并网发电系统由于不能有效及时地检测出供电系统的停电状态而不能及时地与电网切断,从而造成逆变器给周围的用电设备不断地持续供电的电气现象。孤岛效应不仅会对整套配电系统以及用户端的设备造成很大的危害,同时也会对人自身造成伤害,因此孤岛检测具有十分重要的意义^[1-2]。

传统的孤岛效应检测技术根据检测方式的不同可以被划分为两大类:被动式和主动式^[3]。被动式检测技术通过监测公共耦合点(PCC)处的电压、相位、频率和谐波的变化来判断孤岛效应的发生,虽然被动式方法易于实现,但这种方法存在较大的检测盲区^[4-9]。主动式检测技术是指在系统中主动地加上一定的扰动信号,如有功/无功电流、相位、频率或是有功/无功功率等。当孤岛发生时,这些扰动将会使 PCC 处的电压幅值、频率或是谐波发生变化,直至超出正常范围,从而检测出孤岛。虽然主动式检测法的检测盲区很小,但是这些扰动信号会对系统正常运行时的电能质量造成影响^[10-14]。同时在实际中,电网也会出现短时的暂态现象,如电网电压幅值发生变化,在这种伪孤岛的情况下,传统的孤岛检测方法有可能会出现误操作^[15]。既能快速准确地检测出孤岛,又不会对电能质量造成破坏,是对孤岛检测的基本

要求^[16]。针对目前被动式与主动式孤岛检测法存在的不足,本文提出一种基于有功电流-电压不平衡度正反馈的孤岛检测方法。在负载品质因数为 2.5 的情况下以光伏并网发电系统为例进行仿真验证,仿真结果表明,该方法具有非破坏性和无盲区检测等特点,同时能够有效地避免伪孤岛情况下的误操作。

1 孤岛检测原理

当光伏系统单位功率因数并网时,PCC 处的电压由电网决定,此时逆变器工作在输出电流控制模式。设逆变器输出电流初试参考值为:

$$\begin{bmatrix} i_a^* \\ i_b^* \\ i_c^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_m \cos(\omega t) \\ I_m \cos(\omega t - 120^\circ) \\ I_m \cos(\omega t + 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, I_m 为输出电流幅值。

式(1)经 Park 变换可得两相旋转坐标系 dq 轴下的分量:

$$\begin{bmatrix} i_d^* \\ i_q^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_m \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, i_d^* 、 i_q^* 分别为系统有功电流与无功电流的参考值。

当孤岛发生后,由于拓扑结构和负载发生变化,PCC 处电压将会产生不平衡,因此引入有功电流-电压不平衡度正反馈,引入正反馈后,系统的输出电流可表示为:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_m + K\varepsilon \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, K 为正反馈系数; ε 为 PCC 处电压不平衡度。

电压不平衡度为负序电压幅值与正序电压幅值的百分比,即:

$$\varepsilon = \frac{U_m^-}{U_m^+} \times 100\% \quad (4)$$

收稿日期:2014-03-09;修回日期:2014-11-04

基金项目:江苏省科技支撑计划项目(BE2012036);江苏省前瞻性联合研究项目(BY2014127-13)

Project supported by Jiangsu Province Technology Support Program(BE2012036) and Jiangsu Province Prospective Joint Research Project(BY2014127-13)

式(3)经 Park 反变换可得:

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (I_m + K\varepsilon)\cos(\omega t) \\ (I_m + K\varepsilon)\cos(\omega t - 120^\circ) \\ (I_m + K\varepsilon)\cos(\omega t + 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (5)$$

由式(5)可以看出,系统正常并网运行时,引入电压不平衡度正反馈回路不会影响输出电流的频率,并且 GB/T15543—1995 规定正常情况下 PCC 处的电压不平衡度允许值为 2%,短时不能超过 4%,因此正反馈回路对于输出电流也几乎没有任何影响。

基于有功电流-电压不平衡度正反馈检测方法的逆变器并网控制框图如图 1 所示。

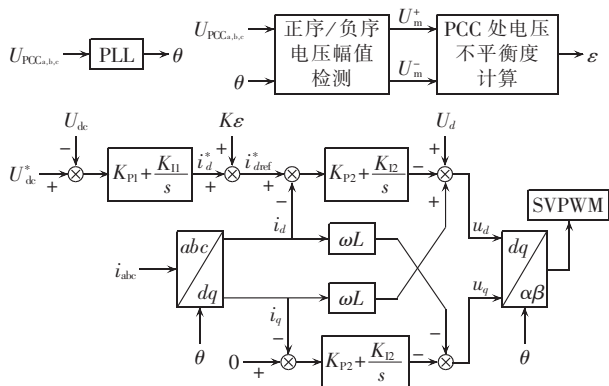


图 1 基于有功电流-电压不平衡度正反馈检测方法的原理框图

Fig.1 Block diagram of islanding detection based on positive feedback from active current and voltage unbalance factor

孤岛发生后,逆变器单独为负载供电,由图 1 可知,系统中存在的有功电流-电压不平衡度正反馈回路将会导致 PCC 处电压不平衡度呈放大趋势,因此,可以通过检测 PCC 处的电压不平衡度是否超过预设阈值来判断孤岛的发生。

对于三相平衡负载,孤岛发生后,PCC 处电压为:

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_a Z_a \\ i_b Z_b \\ i_c Z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (I_m + K\varepsilon)\cos(\omega t + \varphi_z) |Z| \\ (I_m + K\varepsilon)\cos(\omega t - 120^\circ + \varphi_z) |Z| \\ (I_m + K\varepsilon)\cos(\omega t + 120^\circ + \varphi_z) |Z| \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$Z(s) = \frac{RLs}{RLCs^2 + Ls + R}$$

$$|Z| = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)^2}}$$

$$\varphi_z = \arctan \frac{R(1 - \omega^2 LC)}{\omega L}$$

由式(6)可以看出,当孤岛发生后,系数 K 越大,系统正反馈环路增益越高,电压不平衡度越容易被放大,而过大的 K 值将会对正常运行时的电能质量造成影响,因此在实际应用中 K 的取值要综合以上 2 点进行考虑。

在实际中,电网也会出现短时的电压暂态现象,如电网电压幅值、频率或者相位发生变化,在这种伪孤岛的情况下,电压不平衡度会有一个短暂的变化,随后会变回为规定值以下,因此不能单一地根据电压不平衡度是否超过预设阈值来判定孤岛发生。所以本方法引入判定时长 t_p ,当电压不平衡度超过预设阈值 ε^* 的时间超过判定时长 t_p 时,则可确定孤岛确实发生。过长的 t_p 将会导致孤岛发生时系统长时间运行在孤岛状态下,过短的 t_p 将会导致不能有效地判断伪孤岛的情况,因此综合考虑,设定 t_p 为 20 ms。

2 电压正、负序分量提取

电压不平衡度为负序电压幅值与正序电压幅值的百分比,因此本方法的关键是电压正、负序分量的提取。

本文采用基于解耦的正负序分离方法,定义负序坐标系旋转相角 $\theta_N = -\theta_p = -\omega t$,从而可得任意矢量 U 在正负序坐标系下的表达式:

$$\begin{cases} U_{dx}^p = U_d^p + U_d^N \cos(2\omega t) + U_q^N \sin(2\omega t) \\ U_{qx}^p = U_q^p - U_d^N \sin(2\omega t) + U_q^N \cos(2\omega t) \\ U_{dx}^N = U_d^N + U_d^p \cos(2\omega t) - U_q^p \sin(2\omega t) \\ U_{qx}^N = U_q^N + U_d^p \sin(2\omega t) + U_q^p \cos(2\omega t) \end{cases} \quad (7)$$

其中, U_{dx}^p, U_{qx}^p 分别为电压在正序坐标系下的 d, q 轴分量; U_{dx}^N, U_{qx}^N 分别为电压在负序坐标系下的 d, q 轴分量; U_d^p, U_d^N 分别为 d 轴上的正、负序电压分量; U_q^p, U_q^N 分别为 q 轴上的正、负序电压分量。

由式(7)可见,三相电压在正负序坐标系下除了正序的直流量外,还含有幅值为三相电网在正负序坐标系下分量的 dq 轴 2 次谐波,因此只要减去耦合项就可以将正序电压分离出来。解耦部分计算如式(8)所示:

$$\begin{cases} U_{dm}^p = U_{dx}^p - U_d^N \cos(2\omega t) - U_q^N \sin(2\omega t) \\ U_{qm}^p = U_{qx}^p + U_d^N \sin(2\omega t) - U_q^N \cos(2\omega t) \\ U_{dm}^N = U_{dx}^N - U_d^p \cos(2\omega t) + U_q^p \sin(2\omega t) \\ U_{qm}^N = U_{qx}^N - U_d^p \sin(2\omega t) - U_q^p \cos(2\omega t) \end{cases} \quad (8)$$

其中, U_{dm}^p, U_{dm}^N 分别为正序电压与负序电压幅值。

为了完整地分离出正负序信息,将解耦计算输出结果经过一阶低通滤波器(LPF),这样既能够令解耦环节稳定,同时又可以在输入量包含低次谐波时抑制低次谐波干扰,准确分离出正、负序信息。然而低通滤波器的引入势必会造成系统带宽的损失,降低系统的快速性。为了避免低通滤波器对系统带宽的影响,取低通滤波器之前的信息作为系统的反馈变量,正、负序分离方法控制框图如图 2 所示。

3 仿真实验

3.1 孤岛检测

本文在 IEEE Std.1547 标准中所定义的最恶劣

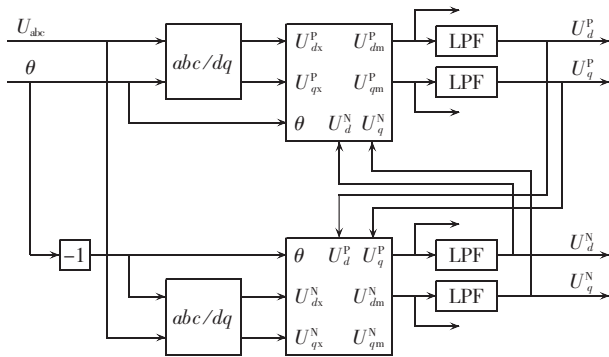


图 2 正、负序分离控制框图

Fig.2 Block diagram of positive and negative sequence separation control

情况下,使用 MATLAB 软件对所提出的孤岛检测方法进行仿真验证。仿真中根据图 3 搭建主电路,具体参数如下:三相电网电压为 380 V/50 Hz,直流母线电压为 580 V,逆变器额定功率为 6 kW,并联 RLC 负载额定功率为 6 kW,负载品质因数为 2.5,开关频率为 10 kHz。由于 GB/T15543—1995 规定正常情况下 PCC 处的电压不平衡度允许值为 2%,短时不能超过 4%,因此仿真中设定电压不平衡度阈值 ε^* 为 3%,伪孤岛判定时长 t_p 为 20 ms。

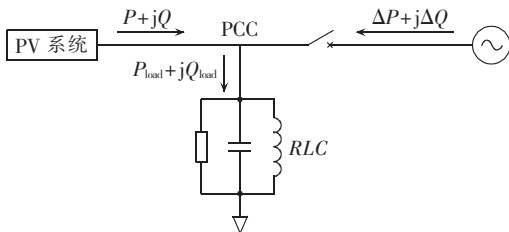


图 3 标准孤岛检测系统主电路拓扑结构

Fig.3 Schematic diagram of islanding detection system

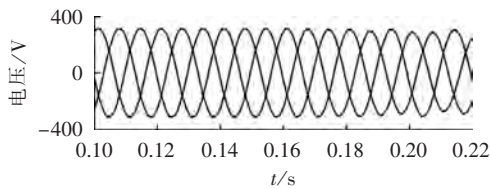
仿真开始时,光伏系统并网运行,在 0.15 s 时,断开三相电网以模拟孤岛的发生,仿真结果如图 4 所示。

由图 4 可以看出,在正常情况下,逆变器输出基本不受影响,当孤岛发生后,电压不平衡度在正反馈回路的影响下迅速增大,并在 0.05 s 后超过预设阈值 3%,在 20 ms 的判定时长内,电压不平衡度一直超过预设阈值,因此在 0.22 s 处判定孤岛发生,整个孤岛检测时间为 0.07 s,符合检测标准。同时,在检测过程中,PCC 处电压和频率均在正常范围之内,电能质量未遭到破坏,实现了非破坏性检测。

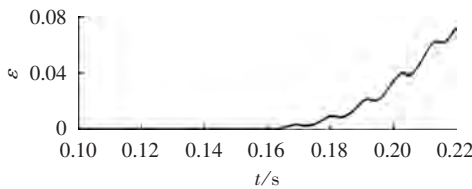
微网的孤岛状态还包括单相和两相断路的情况,检测结果分别如图 5 和图 6 所示。在单相断路和两相断路的情况下,由于电网的不平衡状态,电压不平衡度均能在短时间内超出预设阈值,并且持续时间超过判定时长,孤岛检测成功。

3.2 伪孤岛的防止

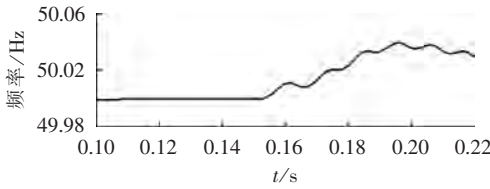
仿真开始时,光伏系统并网运行,在 0.15 s 时,



(a) 三相电网电压



(b) PCC 处电压不平衡度



(c) PCC 处电压频率

图 4 孤岛检测仿真结果

Fig.4 Simulative results of islanding detection

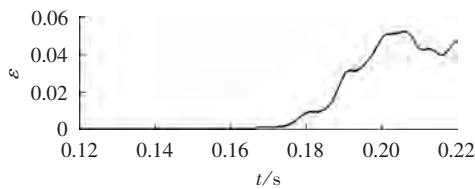


图 5 单相断路孤岛检测仿真结果

Fig.5 Simulative results of islanding detection for single-phase open

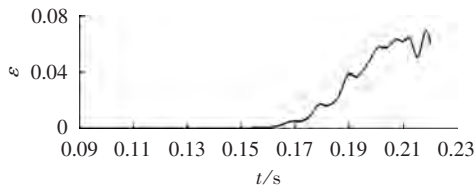
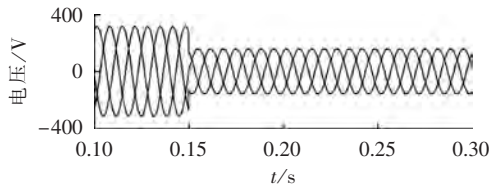


图 6 两相断路孤岛检测仿真结果

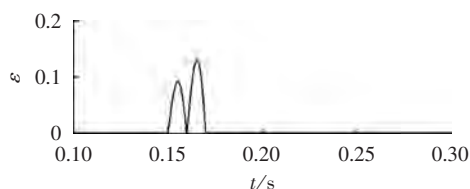
Fig.6 Simulative results of islanding detection for two-phase open

将三相电网电压幅值由 311 V 降为 156 V 以模拟伪孤岛情况,仿真结果如图 7 所示。

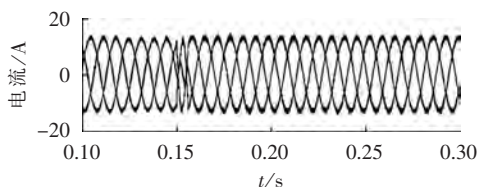
由图 7 可以看出,当伪孤岛发生时,电压不平衡度有一个明显的变化,但在极短时间内又恢复正常,由于在 20 ms 的判定时长内,电压不平衡度没有一直超出预设阈值,所以系统判定为伪孤岛情况。



(a) 三相电网电压



(b) PCC 处电压不平衡度



(c) 逆变器输出电流

图 7 伪孤岛仿真波形

Fig.7 Simulative results of false islanding

4 结论

针对传统孤岛检测方法存在检测盲区和对电能质量造成影响的弊端,本文提出一种基于有功电流-电压不平衡度正反馈的孤岛检测方法,通过对 PCC 处电压不平衡度的检测即可判定孤岛的发生。同时,本方法加入了伪孤岛的判定条件,能够有效地避免伪孤岛情况下的误操作。最后通过 MATLAB 仿真验证,仿真结果证明本方法能够在 IEEE Std.1547 标准所定义的最恶劣情况下快速、有效地检测出孤岛的发生,并且实现了非破坏性与无盲区检测,同时能够避免伪孤岛情况下的误操作。

参考文献:

- [1] 应展烽,陈运运,田亚生,等. 基于抗干扰六点测频法的主动频移孤岛检测[J]. 电力自动化设备,2013,33(4):72-76.
YING Zhanfeng, CHEN Yunyun, TIAN Yasheng, et al. Active frequency shift islanding detection based on anti-interference six-point frequency detection algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(4): 72-76.
- [2] 贺眉眉,李华强,陈静,等. 基于离散小波变换的分布式发电孤岛检测方法[J]. 电力自动化设备,2012,32(10):103-108.
HE Meimei, LI Huaqiang, CHEN Jing, et al. Islanding detection based on discrete wavelet transform for distributed generation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(10): 103-108.
- [3] MAHAT P, CHEN Z, BAK-JENSEN B. Review of islanding detection methods for distributed generation[C]//Third IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies. Nanjing, China: IEEE, 2008: 2743-2748.
- [4] WANG Xiaoyu, FREITAS W, XU Wilsun. Dynamic non-detection zones of positive feedback anti-islanding methods for inverter-based distributed generators[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(2): 1145-1155.
- [5] ZEINELDIN H H, EL-SAADANY E F, SALAMA M M A. Impact of DG interface control on islanding detection and nondetection zones[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(3): 1515-1523.
- [6] ZEINELDIN H H, EL-SAADANY E F, SALAMA M M A. Islanding detection of inverter-based distributed generation[J]. IET Generation, Transmission and Distribution, 2006, 153(6): 644-652.
- [7] STEVENS J, GINN J, GONZALEZ S, et al. Development and testing of an approach to anti-islanding in utility-interconnected photovoltaic systems[R]. Albuquerque, USA: Sandia National Laboratory, 2000.
- [8] 侯梅毅,高厚磊,刘炳旭,等. 基于相位偏移的孤岛检测新方法[J]. 电力自动化设备,2009,29(11):22-25.
HOU Meiyi, GAO Houlei, LIU Bingxu, et al. Islanding detection method based on phase shift[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(11): 22-25.
- [9] REFERN M, USTA O, FIELDING G. Protection against loss of utility grid supply for a dispersed storage and generation unit[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1993, 8(3): 948-954.
- [10] 张凯航,袁越,傅质馨,等. 基于正切滑模频移法的孤岛检测方法[J]. 电力自动化设备,2013,33(12):66-72.
ZHANG Kaihang, YUAN Yue, FU Zhixin, et al. Islanding detection based on tangent sliding mode frequency shift method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(12): 66-72.
- [11] HERNANDEZ-GONZALEZ G, IRAVANI R. Current injection for active islanding detection of electronically-interfaced distributed resources[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(3): 1698-1705.
- [12] KARIMI H, YAZDANI A, IRAVANI R. Negative-sequence current injection for fast islanding detection of a distributed resource unit[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(1): 298-307.
- [13] YU B G, MATSUI M, YU G J. A correlation-based islanding-detection method using current-magnitude disturbance for PV system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(7): 2935-2943.
- [14] YAFAOUI A, WU Bin, KOURO S. Improved active frequency drift anti-islanding detection method for grid connected photovoltaic systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 27(5): 2367-2375.
- [15] JANG S I, KIM K H. An islanding detection method for distributed generations using voltage unbalance and total harmonic distortion of current[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(2): 745-752.
- [16] 李军,黄学良,陈小虎,等. 基于双重判据的微电网快速孤岛检测技术[J]. 电力自动化设备,2012,32(5):38-42.
LI Jun, HUANG Xueliang, CHEN Xiaohu, et al. Detection of islanded microgrid based on double criterions[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(5): 38-42.

作者简介:



孙 博

孙 博(1987—),男,江苏徐州人,博士研究生,主要研究方向为电力电子与电力传动(E-mail: sb16897168@sina.com);

郑建勇(1966—),男,江苏南京人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力电子与电力传动;

梅 军(1971—),男,江苏淮安人,副教授,博士,主要研究方向为电力电子与电力传动。

基于广域测量系统和 CELL 理论的强迫振荡在线感知与定位

蒋长江¹, 刘俊勇¹, 刘友波¹, 苟 竞¹, 陈 晨¹, 刘若凡¹, BAZARGAN Masoud²

(1. 四川大学 电气信息学院, 四川 成都 610065;

2. 阿尔斯通电网研究与技术中心, 英国 斯塔福德 ST17 4LX)

摘要: 为了快速准确地定位电网强迫功率扰动源, 根据“先感知, 再分类, 后定位”的思想, 提出基于广域测量系统的空间特征椭球和决策树混合定位扰动源的新方法。通过对比分析不同强迫功率振荡信号, 将实测的不同受扰轨迹信息映射到多维特征椭球, 通过计算椭球的空间形状及其形态参数变化, 实现强迫功率振荡态势的定量化描述; 在抽取空间椭球特征参数的基础上, 将不同扰动下强迫振荡瞬态阶段的特征椭球参数形成决策树样本集, 利用 C4.5 算法离线训练, 在线匹配以快速分类定位扰动源。算例结果表明, 该方法可以在强迫功率振荡瞬态阶段快速分类定位不同扰动源, 定位振荡主要参与机组和负荷的准确率很高。

关键词: 强迫振荡; 扰动源定位; 广域测量系统; 特征椭球; 决策树

中图分类号: TM 712

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.02.021

0 引言

随着以特高压电网为骨架的全网互联的推进, 电网规模日益扩大, 大型互联电网的高非线性与强动态耦合性导致近年低频振荡现象越来越频繁。强迫功率振荡作为特殊的低频振荡在实际电网中多次发生^[1], 严重地影响了电网安全稳定运行, 降低了联络线输电能力。常规的负阻尼振荡控制措施很难抑制强迫功率振荡, 快速准确切除强迫功率扰动源是现有最好的抑制方法。

随着相位测量单元 PMU (Phasor Measurement Units) 在实时监测电网动态行为的应用, 相关学者提出利用广域测量系统在线识别定位强迫功率扰动源。文献[2]提出运用混合动态仿真技术进行扰动源

定位。文献[3-6]在能量函数的基础上, 利用广域测量数据计算能量流向定位扰动源, 取得了较好的效果。文献[7]利用 PMU 采集不同地点的电压数据, 提出利用行波检测定位扰动源。文献[8]提出利用动态近似简化轨迹在线检测强迫功率振荡, 但只针对单一的有功振荡轨迹进行检测, 很难满足全局的动态可视化要求。上述几种方法丰富了基于广域测量系统在线识别定位强迫扰动源的研究, 但在强迫振荡发生时, 大量的受扰信息涌入调度中心, 因此如何简化轨迹信息, 提高全局的动态可视化能力, 利用提取的关键特征量先感知再定位扰动源的混合方法需要进一步研究。

通过深入分析强迫振荡信号特征与关键属性, 本文提出基于广域系统实测数据的特征椭球 CELL (Characteristic ELLipsoid) 和决策树 DT (Decision Tree) 的扰动源在线感知与定位混合算法。该算法首先将 PMU 实时采集的不同受扰轨迹信息映射到多维空间, 通过观察 CELL 的形状和参数变化, 在线感知强

收稿日期: 2013-12-13; 修回日期: 2014-12-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51261130472); 英国 ALSTOM 公司国际科研合作项目(11H0207)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51261130472) and the British Company ALSTOM International Research Cooperation Project(11H0207)

Islanding detection based on positive feedback of voltage unbalance factor

SUN Bo, ZHENG Jianyong, MEI Jun

(School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: A method of islanding detection based on the positive feedback of voltage unbalance factor is proposed to realize the nondestructive detection without dead-zone. During islanding, the positive feedback circuit will enlarge the voltage unbalance factor of PCC (Point of Common Coupling), which can be calculated to detect the islanding. The duration of the voltage unbalance factor greater than a preset threshold ε^* is introduced as a criterion and a true islanding is detected only when it is larger than the preset time, which is used to avoid the incorrect operation under the false islanding situation. The simulative results indicate that, the proposed method detects the islanding rapidly and accurately under the most severe conditions defined in IEEE Std.1547 and the incorrect operations under false islanding condition are avoided.

Key words: islanding detection; positive feedback; active current; voltage unbalance factor; false islanding