

基于同步发电机的分布式电源孤岛检测方法研究

陆以军, 侯梅毅

(广州供电局有限公司, 广东 广州 510620)

摘要: 相位偏移法是基于同步发电机的分布式电源进行孤岛检测常用方法之一, 文中详细介绍了相位偏移法的原理及算法, 针对传统相位偏移法存在的灵敏度和可靠性矛盾的问题, 给出一种基于同步发电机端电压相位偏移和频率变化的复合型孤岛检测方法, 并在 PSCAD/EMTDC 中对该方法进行了仿真验证, 结果表明该方法能在保证可靠性的前提下, 准确地检测出孤岛状态, 并缩小孤岛检测死区。

关键词: 分布式发电(DG); 孤岛检测; 相位偏移法; 频率变化

中图分类号: TM619

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2013)02-0066-05

近年来, 分布式发电(DG)以其清洁环保、经济高效、供电方式灵活等优势在各国快速发展。目前风力发电、太阳能发电、小水电以及利用工业废气发电等 DG 形式在我国已得到广泛重视与应用。可以预见, DG 与大电网相结合将会是未来电网的发展方向。然而, DG 在给人们带来各种效益的同时, 也给电网带来一定的技术挑战, 孤岛问题便是其中之一^[1,2]。所谓孤岛是指当电网因故障等某些偶然原因使得 DG 系统脱离主电网运行, 并形成由 DG 系统和周围的负载组成的一个自给供电子系统。该子系统虽然与电网隔离, 却有电能的产生、传输和消耗, 但脱离了电力部门的管理, 称之为孤岛。非计划孤岛运行会对电力设备及运行人员的人身安全造成危害, 并且供电质量得不到保证。因此, 并网系统必须具有很强的反孤岛检测功能。英国电力联合会颁布的 G59/1 规定对于长期并网运行且大于 150 kV·A 的 DG 都需配置反孤岛保护; IEEE 在 P1547 中规定非计划孤岛形成后反孤岛保护要将 DG 从系统中切除。这在一定程度上保证了电力系统的安全性, 却破坏了 DG 的正常运行, 损害了 DG 发电商的利益, 不利于 DG 技术的发展。因此, 近几年随着 DG 技术的发展, 提出了微网(Micro-grid)的概念。所谓微网是指由 DG、负载、储能装置、能量变换设施、控制系统等组成的一个小型配电网系统, 它既可以与公用电网并网运行, 也可以与公用电网分离后独立运行。DG 以微网的形式与系统相连, 在孤岛状态下可按计划向微网内的负荷供电, 但其运行的模式将改变, 因而也需要装设孤岛检测装置, 一旦形成孤岛运行需将其切换至孤岛运行模式, 这也是所谓的计划孤岛^[3,4]。总之, 无论 DG 以哪种方式运行, 都需要进行孤岛检测。

目前 DG 种类繁多, 根据所使用一次能源的类型可将 DG 可分为风力发电、太阳能发电、生物发电、地

热发电、小型水利发电、燃料电池发电、潮汐发电、燃气轮机发电等。由于 DG 采用的发电技术不同, 输出的电压类型也不同, 概括起来主要可分为 3 种类型: 工频交流量、直流量和高频交流量。不同类型的输出也决定了其并网方式以及孤岛检测方法的不同, 大致可分为三类^[3]; 第一种类型的 DG 一般可以直接并网, 如小型水电、部分风力发电。这类 DG 的孤岛检测常用无源法, 即根据孤岛发生时, DG 侧的电气参数的变化来判断孤岛是否发生。直接并网的同步发电机的孤岛检测多采用这一方法, 其中较为典型的是以频率变化为依据的各种检测方法。而直接并网的异步发电机由于脱离电网后无法独立运行, 其控制系统中包含失去电网的保护, 实质就是孤岛检测, 一般无需额外的孤岛检测装置。第二种类型需经逆变器并网, 典型的如光伏发电。这类 DG 的孤岛检测常用有源法, 即主动向系统注入特定的检测信号, 或者人为地调节发电机的工况, 然后通过监测由此引起的电气参数的变化来判断 DG 是否处于孤岛运行状态。第三种类型则需整流后再经逆变器并网, 如微型燃气轮机。这类 DG 的孤岛检测也常用有源法。本文着重探讨直接并网的同步发电机这一类型 DG 的孤岛检测方法。

1 同步发电机的孤岛检测方法

目前基于同步发电机的 DG 孤岛检测最为常用的 2 种方法是相位偏移法和频率变化率法, 本文重点探讨相位偏移法^[5-7]。

相位偏移法是通过测量 DG 机端电压相位角的变化来检测孤岛状态。安装有相位偏移检测装置的 DG 系统等值电路, DG 为同步发电机, 如图 1 所示。DG 并网运行时, 发电机的电动势与端电压的相位差为 δ , 相量图如图 2 (a) 所示。如果由于故障等原因断路器 CB2 跳开形成孤岛, 负载 L 的功率完全由 DG 承担, 由于 DG 所带负载功率的突然增加(或减少), 流过发电机电抗

的电流增大(或减少),电动势与端电压的相位差随之增大(或减少),如图2(b)所示(图示为增大情况)。相应地,端电压将从孤岛前的跳变到一个新的值,其相位也随之改变。而在孤岛发生瞬间可认为电动势是不变的,则与之间的相位差即为的变化值。端电压的这种变化称之为相位偏移,相位偏移法就是根据这一特性来判断DG是否处于孤岛状态的。

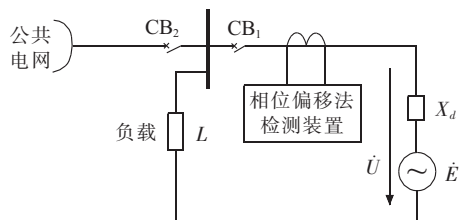


图1 装有孤岛检测装置的系统等值电路

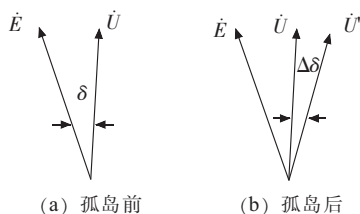


图2 孤岛前后发电机电动势与端电压相量图

2 相位偏移法的算法研究

相位偏移法的检测性能与相位偏移的算法密切相关。传统的相位偏移算法,算法简单、易于实现,但当孤岛瞬间功率不平衡程度较小时,很容易产生检测死区。降低检测阈值能缩小检测死区,但同时也会增加误判的风险,存在灵敏性和可靠性的矛盾。鉴于此,本文给出了另外一种积分算法。当孤岛瞬间DG输出的有功功率与负载的功率不平衡程度较小时,由此产生的相位偏移量会很小,存在检测死区。这种情况下,如果能够计算出一段时间内相位偏移的累计值,这样即使很小的功率不平衡度,也能使相位偏移量超过阈值,从而很容易地检测出孤岛状态,提高孤岛检测的灵敏度^[8]。当孤岛发生时频率会发生变化,孤岛后一段时间内相位偏移的累积值为:

$$V\theta = 2\pi \int_{t_1}^{t_2} (f_{DG} - f_0) dt \quad (1)$$

式(1)中: f_{DG} 为孤岛后的频率; f_0 为孤岛前的频率,一般为系统的额定频率,故计算时可近似为 $f_0 = 50$ Hz。

由式(1)可知,当孤岛瞬间不平衡功率很小时,频率变化也很小,但若积分时间足够长(小于重合闸时间),即使很小的也会使相位角发生较大偏移,通过选取适当的阈值便能很容易将孤岛检测出来。

通过前文对相位偏移特性和算法的分析,下面给出一种基于相位偏移的复合型孤岛检测方法,该方法

将孤岛发生时DG的频率变化与相位偏移相结合组成复合判据。

3 基于相位偏移法的复合型判据

由式(1)可知,相位偏移角由频率波动的大小和波动所持续的时间2个因素决定。而对于相同大小的相位偏移量,若频率变化所持续的时间不同,相应的频率变化情况也不尽相同,如图3所示。图中 t_1, t_2 及 t_1', t_2' 分别为两种不同情况下频率变化的起始及结束时刻, $\Delta\theta$ 为图中阴影部分的面积, Δf_{max} 为频率恢复时间内变化的最大值。可见对于相同的 $\Delta\theta$,相应的频率变化最大值是不同的。

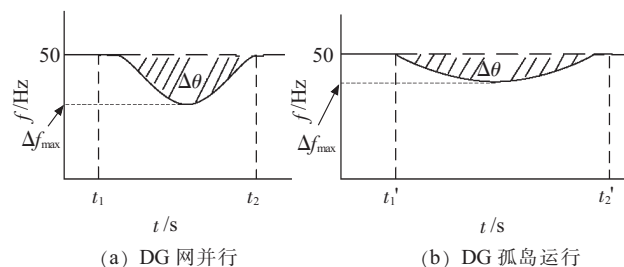


图3 相同相位偏移量情况下频率变化量区别

对于相位偏移法来说,比较难以区分的两种情况是孤岛状态下功率不平衡程度很小时所导致DG端电压的相位偏移以及DG正常并网运行时靠近DG端的较大负荷波动而导致DG端电压的相位偏移。对于前者,孤岛状态下DG有功输出基本与孤岛区域内负荷相当,DG端电压的相位偏移量会很小,可能会判断不出孤岛状态如图3(b)所示;而对于后者,较大的负荷波动也有可能导致DG端电压发生一定的相位偏移,可能会误判为孤岛状态,如图3(a)所示。假定上述两种情况下相位偏移大小相同,下面重点分析频率变化的情况。对于孤岛状态而言,由于DG自身的频率调节能力相对较弱,其频率调节持续的时间相对较长,相应的频率变化值较小。而对于近端负载波动情况,即使波动瞬间导致DG转速发生变化,但由于电网较强的抗扰能力,很快会将DG重新拖入同步,因此,DG频率变化的持续时间通常会很短,由图3(a)可知,若产生相同的相位偏移量,其所对应的频率变化量也较大。根据以上分析可知,当两者产生相同的相位偏移量时,相应的频率变化量是不同的。鉴于此,可以将频率变化值作为孤岛检测量,与相位偏移相结合组成复合判据用于孤岛检测。

复合型检测方法仍以检测相位偏移为主,设置2个阈值 $\Delta\theta_1$ 和 $\Delta\theta_2$,且 $\Delta\theta_1 > \Delta\theta_2$ 。为避免负荷波动导致的误判,可将 $\Delta\theta_1$ 选的相对较大,而 $\Delta\theta_2$ 是为减小检测死区而设置的。当相位偏移角 $\Delta\theta > \Delta\theta_1$ 时,直接判断为孤岛状态;而当最大检测时间内 $\Delta\theta < \Delta\theta_1$ 时,引入频

率变化门檻值 Δf_{thr} , 只有同时满足 $\Delta\theta > \Delta\theta_2$ 且 $\Delta f_{max} < \Delta f_{thr}$, 判断为孤岛状态, 此时的 $\Delta\theta$ 为最大检测时间内的相位偏移累计值, Δf_{max} 为最大检测时间内频率变化的最大值。此外为了防止避免发电机启动、系统发生电压波动等情况下误判, 这里还设置了电压辅助判据, 而当电压低于某一门檻值时即闭锁孤岛检测。综上所述, 可将孤岛检测的复合型判据归纳如下:

$$\begin{cases} \text{主判据 } \Delta\theta > \Delta\theta_1 \& U \geq U_{thr} \\ \text{辅助判据 } \Delta\theta > \Delta\theta_2 \& \Delta f < \Delta f_{thr} \& U \geq U_{thr} \end{cases} \quad (2)$$

该方法增加了辅助判据, 用于孤岛后不平衡有功功率变化不大的情况, 即利用主判据无法检测出的孤岛状况, 通过降低门檻值、引入频率变化值来区分孤岛与非孤岛状态。 Δf_{thr} 的选取应大于上述临界情况下(主判据刚好无法检测出)孤岛时产生的频率变化最大值, 的选取与灵敏度要求有关, 选取的值越小灵敏度越高, 误判的几率也会相应增加。

4 复合型判据的仿真研究

为对判据进行验证, 在 PSCAD/EMTDC 环境下搭建如图 4 所示的仿真系统。其中 DG 为带有励磁调节和调速控制的同步发电机, 励磁系统采用 IEEE 的 AC8B 励磁模型, 发电机模型为 TUR1, 其调速系统采用 IEEE 的 EDH 模型。负载 L_1 接在近 DG 侧, 其类型设定为恒功率模型。以下仿真均假定 $t = 0.5$ s 时断路器 QF2 断开, DG 和负载 L_1 脱离公用电网组成一个孤岛系统或是在 $t = 0.5$ s 时投切负荷模拟系统负荷波动。且本文只给出了孤岛瞬间孤岛内总负荷大于机组出力的仿真结果和结论, 负荷波动则只给出了系统增加负荷的仿真结果与结论, 而通过对与这两种情况相反的情况进行仿真分析, 也可以得到同样的结论。

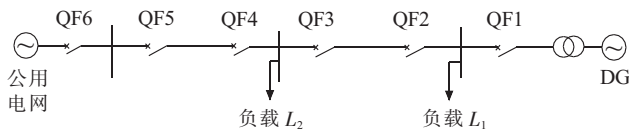


图 4 孤岛仿真系统

利用 PSCAD/EMTDC 的逻辑模块构建出复合判据的逻辑判断框图, 如图 5 所示。

4.1 主判据的仿真分析

采用图 4 所述的仿真系统, 这里将端电压相位偏移的最大检测时间设为 500 ms (小于重合闸时间), 为了避免负荷波动导致误判, 这里将主判据门檻值设定的较大, 为 $\Delta\theta_1 = 50^\circ$ 。DG 并网运行时, 系统中负荷 L_1 总有功为 3.65 MW, DG 输出有功为 3 MW, 孤岛瞬间 DG 输出的有功功率则会由 3 MW 突变至 3.65 MW, 发电机端电压的频率变化、相位偏移以及孤岛状态检测情况如图 6 所示。

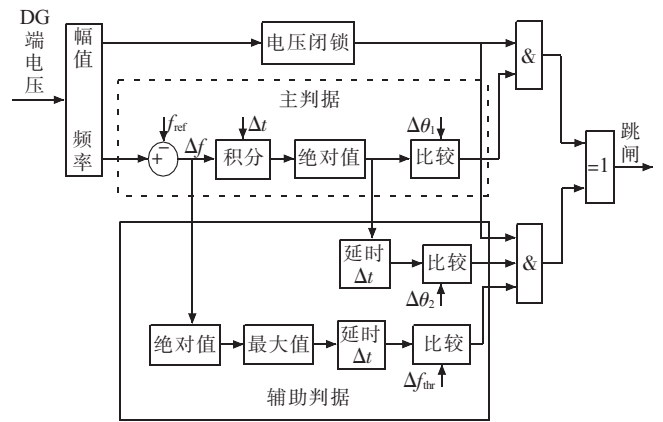
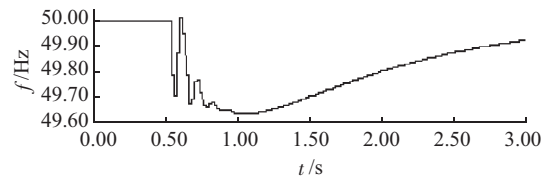
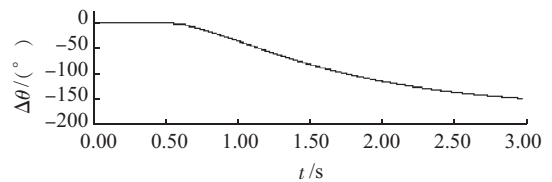


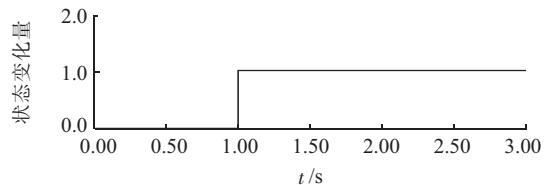
图 5 复合型孤岛检测方法逻辑判断框图



(a) 频率变化



(b) 相位偏移



(c) 孤岛状态检测情况

图 6 主判据临界点情况 ($\Delta P = 0.65$ MW)

由图 6(b)、图 6(c) 可以看出, 相位偏移角在孤岛检测最大允许时间 500 ms 时达到 50° , 若在此基础上继续减小有功功率的不平衡程度, 则主判据将不能检测出孤岛, 即主判据所能检测的临界不平衡功率为 $\Delta P = 0.65$ MW, 若不平衡功率大于 0.65 MW 时, 均可以正确判断出孤岛状态。此外, 由图 6(a) 可知, 此时频率变化最大值约为 0.4 Hz, 可以以此作为辅助判据的频率动作门檻值。

4.2 辅助判据的仿真分析

为进一步减小检测死区, 这里取 $\Delta\theta_2 = 15^\circ$, $\Delta f_{thr} = 0.4$ Hz。DG 并网运行时, 系统中负荷 L_1 有功为 3.18 MW, DG 输出有功为 3 MW。孤岛瞬间 DG 输出的有功功率由 3 MW 突变至 3.18 MW, 发电机端电压的频率变化和相位偏移如图 7 所示。

由图 7 可知, 相位偏移角在孤岛检测最大允许时间 500 ms 时达到 15° , 且频率变化的最大值小于 0.4

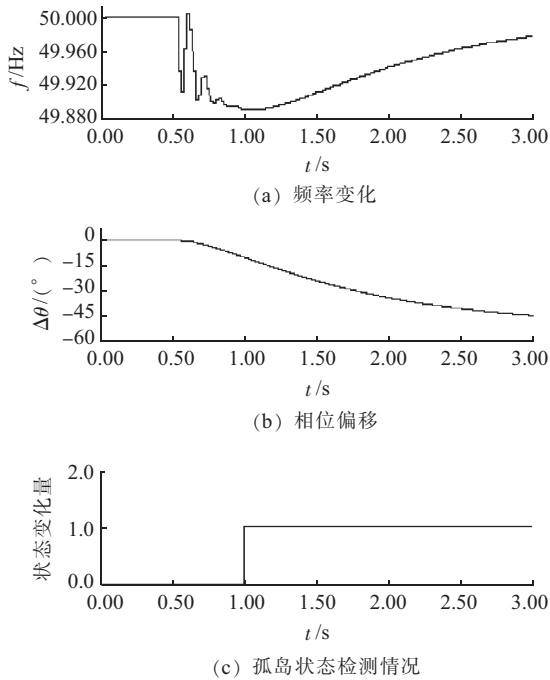


图7 辅助判据临界动作点情况($\Delta P=0.18$ MW)

Hz,即辅助判据所能检测的临界不平衡功率 $\Delta P=0.18$ MW。在主判据不能在规定时间内判出孤岛的情况下,辅助判据能正确判断出孤岛状态,缩小了检测死区。为验证辅助判据的可靠性,这里进行如下仿真。DG 并网运行时,当 $t=0.5$ s 时,在 DG 近端投入负荷 3.5 MW, DG 端电压频率变化及相位偏移如图 8 所示。

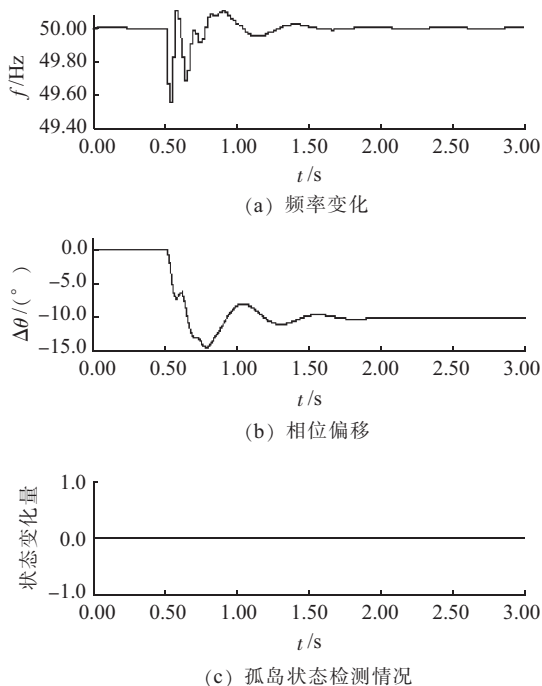


图8 辅助判据的可靠性验证($\Delta P=3.5$ MW)

由图 8 可知,在孤岛最大检测时间内,相位偏移的最大值达到 15° ,但由于 DG 频率变化的最大值大于 0.4 Hz,故不会发生误判。当负荷波动小于 3.5 MW 时,相位偏移的最大值也小于 15° ,亦不会误判;如果负

荷波动大于 3.5 MW,虽然 DG 端电压相位偏移角超过 15° ,但其频率变化的最大值也会大于 0.4 Hz,所以也不会发生误判。而上述这些情况,如果不引入频率作为辅助判据,则当负荷波动大于 3.5 MW 时,就会发生误判情况。由此可见辅助判据是十分可靠的。此外这里也可以看出,不能一味通过缩小辅助判据的大小来减小检测死区,因为小负荷波动很可能会导致相位偏移量大于,同时频率最大变化量又小于的情况出现,从而使得辅助判据误判。

综上所述,基于相位偏移和频率变化的复合型孤岛检测方法在保证可靠性的前提下,能有效检测出孤岛状态,缩小孤岛检测死区,提高孤岛检测灵敏度。

5 结束语

本文详细介绍了相位偏移法的原理及算法,针对传统相位偏移法存在的灵敏度和可靠性矛盾的问题,文中给出一种基于相位偏移和频率变化的复合型孤岛检测方法。该方法设置了主辅两个判据,在辅助判据中引入了频率变化作为辅助判断量,在保证可靠性的前提下,有效解决了功率不平衡程度较小时孤岛检测难的问题,缩小了孤岛检测死区。最后在 PSCAD/EMTDC 中对该复合判据进行了仿真分析和验证,结果表明:该方法在保证可靠性的前提下,能准确地检测出孤岛状态,缩小孤岛检测死区,提高孤岛检测灵敏度。

参考文献:

- [1] JENKINS N, ALLAN R, CROSSLEY P, et al. Embedded Generation [M]. London: IEE, 2000:1-19.
- [2] 丁明,王敏. 分布式发电技术[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(7):31-36.
- [3] XU W, MAUCH K, MARTEL S. An Assessment of DG Islanding Detection Methods and Issues for Canada [R]. Ottawa, Canada: CETC, 2004:15-23.
- [4] KIM J E, HWANG J S. Islanding Detection Method of Distributed Generation Units Connected to Power Distribution System [C]. Proceedings of IEEE International Conference on Power System Technology, December :643-647.
- [5] FREITAS W, XU W, AFFONSO C M, HUANG Z. Comparative Analysis Between ROCOF and Vector Surge Relays for Distributed Generation Applications[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 1315-1324.
- [6] ISHIBASHI A, IMAI M, OMATA K, et al. New Type of Islanding Detection System for Distributed Generation Based on Voltage Angle Difference Between Utility Network and Distributed Generation Site [C]. Eighth International Conference on Developments in Power System Protection, Amsterdam, Netherlands: IEE, 2004: 542-545.
- [7] FREITAS W, HUANG Z, XU W. A Practical Method for Assessing the Effectiveness of Vector Surge Relays for Distributed Generation Applications [J]. IEEE Transactions on Power Delivery,

2005, 20(1): 57-63.

- [8] HOU M, GAO H, LU Y. A Composite Method for Islanding Detection Based on Vector Shift and Frequency Variation [C]. Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, 2010, China.

作者简介:

陆以军(1986),男,安徽六安人,助理工程师,从事电力调度工作;
候梅毅(1963),男,广东梅州人,副教授,从事分布式发电方面的研究工作。

Research on Islanding Detection Method for DG Based on Synchronous Generator

LU Yi-jun, HOU Mei-yi

(Guangzhou Power Supply Bureau, Guangzhou 510620, China)

Abstract: Phase shift is one of the common methods of islanding detection for distributed generation based on synchronous generator. The principle and algorithm of phase shift method are detailed in this paper. To solve the contradiction problem of reliability and sensitivity of conventional vector shift method, this paper presents a composite islanding detection method utilizing both angle change and frequency variation derived from synchronous generator terminal voltage. Simulations are performed using generic PSCAD/EMTDC. Results show that islanding state can be accurately detected and the non-detection zone can be effectively narrowed down by the composite method on the premise of reliability.

Key words: distributed generation (DG); islanding detection; phase shift method; frequency variation

(上接第 63 页)

Distribution System Fault Recovery Using Stochastic Programming Theory Including Asynchronous Wind Power Generation

GU Guo-hua¹, QIN Yong-gang²

(1. NARI Technology Development Co. Ltd., Nanjing 210061, China; 2. Power Transmission and Distribution Work Area, Nongyi Shi Electric Power Company, Akesu City, Xinjiang Uyghur Autonomous Region 843000, China)

Abstract: Due to the randomness and intermittence, a wind power injection power model is built using the wind speed as input. Considering the characteristic of Weibull wind speed distribution, stochastic programming theory is introduced into fault recovery of distribution network including asynchronous wind power generation. A Chance Constrained Programming (CCP) model is used to tackle such optimization. The Clonal Genetic Algorithm with Tabu Search and Memetic local search strategy is used to solve the problem, which could improve the search efficiency. The IEEE 33 buses system is taken as the test case to verify the proposed model and algorithm.

Key words: distribution system; fault recovery; asynchronous wind power generation; stochastic programming theory; clonal genetic algorithm

(上接第 65 页)

Power Usage Information Acquisition Data Accuracy Automatic Confirmation Technology and Its Application

QIAN Li-jun¹, LI Xin-jia²

(1. Jiangsu Electric Power Company, Jiangsu Nanjing 210024;

2. Jiangsu Frontier Electric Technologies Co. Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: The Power Usage Information Acquisition System is an important project of intelligence power grid construction of State Grid. The power usage information acquisition system install a huge number of new customers every day, automatic data analysis ability is required to confirm the correctness of the data, to reduce the artificial debugging and errors. This paper presents a method that contrasts the collecting date under construction debugging process with the marketing system electricity settlement meter reading data to determine the correctness of the collecting date. Principle and decision algorithm are given in this paper, as well as analysis of reasons for difference commonly occurred in terminal installation debugging process. This method significantly reduces the workload of terminal debugging and improves the accuracy of the data gathering, playing a great role in quality management of the power usage information acquisition system construction process.

Key words: power usage information acquisition; data comparison; algorithm