

并网分散电源的解列与孤岛运行

丁磊,潘贞存,苏永智,丛伟

(山东大学 电气工程学院,山东 济南 250061)

摘要:根据有功功率平衡原则、分散电源的产权关系和电气分布,提出了一种配电网分层孤岛运行的概念,可充分利用分散电源的供电能力,提高供电可靠性。接入多个分散电源的配电网络可划分为电厂级孤岛和变电站级孤岛,故障后的网络根据负荷匹配情况分层逐级解列。孤岛形成过程中,通过监测联络线的稳态功率变化计算孤岛内的功率不平衡,充分考虑孤岛的调节能力实现实时减载。最后,介绍了一种实现分层孤岛运行的分层分布式控制系统,借助高速通信网络,完成分层解列、实时减载、再同步与重合闸等功能。

关键词:分散电源; 分层孤岛; 实时减载; 解列

中图分类号: TM 76

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)07-0025-04

0 引言

这里所定义的分散电源是广义上的分散电源,包括各种新型的分布式发电技术及国内目前普遍存在的热电联产、小型水电、小型企业自备电厂、综合利用电厂等小容量(<50 MW)的地区电源。大量分散电源的接入改变了配电网的结构和潮流,给配电网的保护和控制带来了很大的影响^[1-2]。尤其是分散电源解列或并网线故障跳闸时,都会形成短暂的孤岛,带来一系列问题:

- 引起同期问题,影响线路重合闸的使用,需采用检同期重合闸或解列重合闸^[3-4];
- 孤岛易与主系统失步,造成重合闸检同期失败,延长了系统的恢复时间^[5];
- 孤岛内的功率不平衡较大时,解列后很难保持稳定运行,往往迅速瓦解,造成本地负荷失电,降低了供电可靠性^[1,5];
- 孤岛内缺少快速控制措施,对负荷变化的控制能力不足,供电质量差^[6]。

如果配电网发生故障以后,在保证电力系统安全的前提下,尽可能维持分散电源正常供电,而将部分配电网转化为孤岛自治运行,将可以提高供电可靠性,减小对系统备用的要求,利于系统恢复,对电网公司、分散电源所有者和用户都是有利的^[5,7]。

孤岛运行的主要问题是孤岛划分和孤岛形成后的控制措施。孤岛划分就是解列点的选择问题。孤岛形成后,还需要有一系列的保护控制措施,如减载、切机等来保证孤岛的稳定运行。目前,主要存在解列点不合理、控制措施不完善等问题。

文献[7-10]提出主动解列的概念,通过实时搜索孤岛区域,动态地确定解列点和动作时序。主动解

列需借助高速通信手段,实时采集电网拓扑结构和潮流数据,由中心控制单元确定合理的解列策略并下发。在大电网中可采取实时搜索方法,尽可能寻找合理的解列策略,有利于孤岛稳定运行和系统恢复。而在配电网中,由于以下几点原因很难实现解列的实时决策:

- 配网接线复杂,运行方式变化大,增加了决策的复杂度;
- 解列点处必须有同期装置便于系统恢复,变化的解列点意味着需要大量资金支持;
- 需要完善的信息采集系统、高速通信网络和全网集中决策,配电网中很难实现这一点。

为保证解列后孤岛快速达到稳定运行,常用的控制措施主要有减载、切机、发电机快速改变出力、投切并联电抗器及并联电容器等^[11]。目前的研究多集中在孤岛的减载策略上。常见减载方案有低压减载、低频减载、按频率变化率减载及连锁切负荷等^[12]。低频减载装置的动作较慢,孤岛内功率缺额很大时不能及时抑制频率下降。按频率变化率的减载装置则过于灵敏,在系统受到扰动或短路故障时容易误动。这些传统减载装置的定值都是固定的,往往造成切负荷不足或过切。

在此,根据功率平衡原则、分散电源的产权关系和电气分布,提出一种分层孤岛运行的概念,将孤岛划分为电厂级和变电站级。孤岛形成后,通过监测联络线的稳态功率变化计算孤岛内的功率不平衡,实现实时减载,使孤岛尽快达到稳定运行。

1 孤岛运行

首先,定义功率差额 Δd_i 来表征孤岛 i 内的功率平衡情况:

$$\Delta d_i = \sum_{k \in i} S_{G,k} - \sum_{l \in i} S_{L,l} = S_G^i - S_L^i \quad (1)$$

其中, S_G^i 和 S_L^i 表示孤岛 i 内的发电机总出力和总负荷的复功率。由于无功不平衡可以就地补偿,且有功不平衡对孤岛的频率特性影响更大,所以研究的重点

在有功平衡上。式(2)重新定义功率差额 Δd_i 来表征孤岛 i 内的有功功率平衡^[8-9]。

$$\Delta d_i = P_G^i - P_L^i \quad (2)$$

要保证孤岛的稳定运行,就需要维持孤岛内的功率与负荷平衡。一般情况下,发电机运行时都会有一定的调节裕量,应付负荷的正常波动。因各种原因出现的功率不平衡都不能超过孤岛的调节能力,否则就可能使孤岛失去稳定性。

1.1 单机孤岛调节能力

以热电联产中常用的背压式汽轮机为例,单机孤岛的简化频率响应模型如图 1 所示。

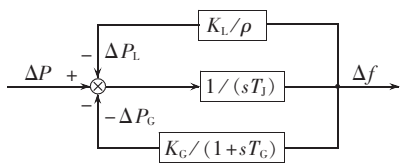


图 1 单机孤岛简化频率模型

Fig.1 Simplified frequency model of single-machine island

在孤岛形成初期,通过旋转惯量、负荷调节特性和发电机调节能力可缩小功率不平衡量^[8-9]。式(3)定义了孤岛 i 的有功不平衡的最大容许能力 ε_i 。满足式(4),孤岛才能维持稳定运行。

$$\varepsilon_i = \Delta f \cdot P_{Gi} \cdot K_{Gi} / f_e \quad (3)$$

式中 K_{Gi} 为发电机的单位调节功率; Δf 为孤岛允许的频率偏差。

$$\Delta d_i < \varepsilon_i \quad (4)$$

式(3)只考虑了孤岛内发电机的一次调频能力,忽略了负荷调节能力和旋转惯量的作用。相对发电机调节而言,负荷调节和旋转惯量的作用很小,适当的裕度也有利于孤岛快速恢复稳定运行。

1.2 多机孤岛调节能力

岛内包含多个分散电源时,扰动瞬间功率缺额按转动惯量分配到各发电机转子上,负载旋转惯量也承担了一部分负荷变化,所有转子转速按同一加速度变化^[13-14]。从扰动瞬间到稳定的过程中,发电机按各自的调差系数成反比来承担负荷增量^[14-15]。所以多机孤岛的有功不平衡的最大容许能力可定义为岛内所有分散电源的调节能力之和。

$$\varepsilon = \sum \Delta f \cdot P_{Gi} \cdot K_{Gi} / f_e = \sum \varepsilon_i \quad (5)$$

除了功率平衡约束外,孤岛运行还需要满足静态稳定约束和暂态稳定约束等条件。

2 孤岛的划分(解列)

孤岛的划分就是要寻找合理的解列点,使解列后的系统能维持稳定运行。理论上,解列点应选在分散电源所能带的负荷的功率平衡点上,以保证解列后系统的稳定运行,但是由于分散电源出力不稳定,功率平衡点是变化的。而配网中很难实现实时搜索解列的策略,所以需要预先设定合理的解列点,然后采取控制措施保证孤岛内功率平衡。系统中功率平衡

的区域很多,有多种解列方案,过多的解列点的设置需要更多的同期装置,使操作更加复杂、投资增加,所以解列点数量不宜过多。

配电网主要是辐射状结构,分散电源通过配电站与系统相连接。考虑到功率平衡原则、分散电源的产权关系、电气分布、地理位置及调度管辖范围等因素,可规划两级孤岛——电厂级和变电站级。电厂级孤岛(mini island)为包含一个或一组分散电源及其周边负荷的功率基本平衡区域。变电站级孤岛(substation island)为包含配电站部分或全部负荷及其下级所有分散电源的功率基本平衡区域,解列点一般设置在配电站系统进线或母联开关上。一个变电站级孤岛可以包含多个电厂级孤岛。如图 2 所示,Zone₁ 和 Zone₂ 为电厂级孤岛,SP₁ 和 SP₂ 分别为电厂级孤岛的解列点;Zone₀ 为变电站级孤岛,SP₀ 为变电站级孤岛的解列点;电厂级孤岛 Zone₁ 和 Zone₂ 包含在变电站级孤岛 Zone₀ 中。

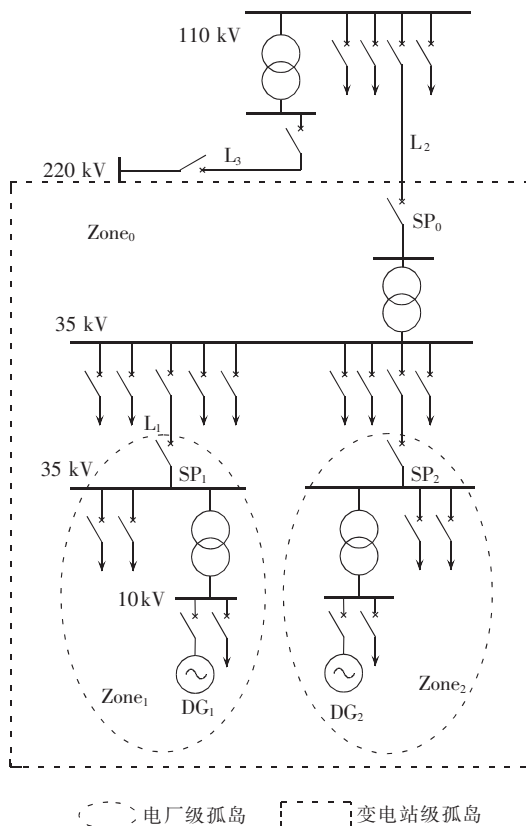


图 2 分层孤岛的示意图

Fig.2 Sketch map of hierarchical islands

定义分层孤岛运行的策略后,分散电源的解列就有电厂级孤岛解列、变电站级孤岛解列、分层孤岛解列 3 种方式。

分散电源往往带有自己的负荷,这部分自有负荷离分散电源比较近,产权上属于分散电源所有者,必要时可与系统断开由分散电源单独供电,即采用电厂级孤岛解列。这也是目前普遍采用的解列策略。

分散电源容量较大、并网电压等级较高时,可能带

有自属升压变电站。此时分散电源及变电站产权统一,若分散电源可以承担变电站的全部或主要负荷,可采用变电站级孤岛解列。根据分散电源与负荷的匹配程度,解列点可选在变电站系统进线或母联开关上。

若配电站下级连有多个分散电源,且这些电源总容量可承担变电站的全部或主要负荷,可采用分层孤岛解列的措施。首先形成变电站级孤岛,若不能维持稳定运行,则进一步解列,形成多个电厂级孤岛。

根据分散电源的分布、容量和本地负荷的大小,可以灵活地选择不同的解列方式,充分利用分散电源的供电能力,减小停电面积,提高供电可靠性。

3 实时减载

配电网主要是辐射状结构,分散电源只通过一条或几条并联网络线连接到变电站上,与系统并网。这种结构便于集中采集孤岛联络线的功率信息,通过监测解列前后孤岛所有联络线的稳态功率变化,可以准确计算孤岛内的功率不平衡。式(6)中, Δd_i 为解列前后孤岛*i*与外界交换功率的变化量, $P_{intertie_j0}^i$ 为联络线*j*断开前功率,断开后功率 $P_{intertie_j}^i$ 为0。以图2为例,DG₁并网运行,系统通过L₁向Zone₁供电20 MW,此时SP₀断开,孤岛内将出现20 MW的功率缺额。

$$\Delta d_i = \sum (P_{intertie_j}^i - P_{intertie_j0}^i) = \sum (0 - P_{intertie_j0}^i) = \sum \Delta P_{intertie_j}^i \quad (6)$$

联络线断开前稳态功率可用来表征孤岛内功率不平衡,但线路故障或系统扰动暂态过程中,联络线的功率会发生变化。此时联络线功率就不能正确反映孤岛与外界功率交换。实时减载装置中,可采用功率突变量启动元件判断短路故障或系统扰动。功率突变量元件启动,利用启动前的数据计算联络线稳态功率并保存,启动后的数据舍弃。若整定时间 $t_{setting}$ 内解列点开关未全部跳开,则复位启动元件并清除计算结果。为减小计算误差,稳态功率可进行滤波并采用几个周期内的平均值。式(7)定义了实时减载的切负荷量,它等于功率缺额与孤岛调节量之差。

$$P_{shedding_i} = \Delta d_i - \varepsilon_i \quad (7)$$

实时减载通过联络线功率变化来计算孤岛内功率不平衡,在孤岛形成瞬间即甩掉多余负荷,平缓了孤岛内的暂态过程,有利于维持孤岛的稳定运行。实时减载的思想同样可以用于有功过剩和无功不平衡的情况,根据计算的功率不平衡量采取切机、投切电容器等措施。

为提高重合闸的检同期成功率,便于系统恢复,设定减载量时只考虑了电源的一次调频能力,使孤岛可以在几秒到几十秒内迅速达到稳定运行。由于没有考虑负荷调节效应、旋转惯量、发电机中长期响应,所切负荷量要大于孤岛实际的功率缺额。分散电源有些情况下会满出力运行,没有调节能力,为防止实时减载切负荷不足,并应对孤岛运行时出现的负荷波动,还需要增加低频减载功能,作为实时减载的后备。

除功率平衡外,还要考虑孤岛的静态稳定问题^[8-9]。由于孤岛形成后岛内潮流的变化,可能出现部分线路过载,甚至超过线路传输容量的限制。此时应进一步减载,切除相应的负荷,如式(8)所示。

$$P_{shedding2} = \sum (P_j - \alpha P_{max_j}) \quad (8)$$

式中 P_{max_j} 是线路的最大传输功率; α 为可靠系数。

与传统的低频减载相比,实时减载可以根据孤岛内的实际功率缺额,精确地切除相同数量的负荷。切除的负荷量准确,动作速度快,有利于提高孤岛的暂态稳定性。

4 分层孤岛控制系统

为实现第2节中介绍的分层孤岛运行,需要一套基于高速通信系统的分层分布式控制系统。控制系统的层次对应于孤岛运行划分的层次,第1层控制由安装在分散电源侧的分散电源控制单元DGU(DG control Unit)构成,每个DGU管理一个电厂级孤岛。第2层控制由安装在配电变电站的变电站控制单元DSU(Distributed Substation control Unit)实现,一个配电变电站安装一个DSU。

DGU和DSU都监视并联网络线功率、解列点开关状态、开关两侧同期信息、母线电压、频率等,并接入可减载的负荷馈线。所有采集的信息都可以在母线附近获取,安装方便,易于获取信息。DGU和DSU之间通过光纤网或以太网等高速通信网络传输必要的信息。DGU控制电厂级孤岛的运行,与上层控制单元DSU交换必要的信息。DSU控制变电站级孤岛,并管理下级所有DGU。

4.1 变电站级孤岛

当并网线故障或系统扰动引起解列时,为充分利用分散电源的供电能力,提高供电可靠性,变电站级孤岛是第一选择。DSU的主要功能包括:

- a. 监测解列点开关状态,判断孤岛是否形成;
- b. 监测并网线功率变化,计算孤岛内功率缺额,见式(5);
- c. 甩掉多余的负荷,实现实时减载,使孤岛内功率平衡,见式(6);
- d. 功率缺额大于总可减负荷量或用户整定值时,发解列信号给下级DGU;
- e. 与DGU通信,实时更新参数(孤岛最大调节能力、可利用的自动同期装置);
- f. 传输同期信息给下级DGU,利用DGU的同期调节实现变电站解列点的同期;
- g. 与系统检同期再并网。

为实现以上功能,需事先进行离线工作,主要包括预先规划解列策略,确定解列点;确定变电站的基本负荷大小;确定减载的优先级及总的可减负荷量。

4.2 电厂级孤岛

出现以下几种情况时,应形成电厂级孤岛运行:

- a. 电厂级孤岛与变电站之间的并网线故障时,

应解列该电厂级孤岛;

b. 当变电站级孤岛内的功率缺额大于总可减负荷量,即分散电源不能承担变电站的基本负荷时,应由 DSU 传送解列信号给下级 DGU,将所有电厂级孤岛解列;

c. 为保护分散电源,发电机保护动作解列电厂级孤岛。

DGU 的部分功能与 DSU 相同,如 DSU 的第 **a~c** 项及第 **g** 项功能。除此之外,DGU 还要有自动同期装置,来提高与系统再同步的成功率。如果变电站级孤岛的解列点检同期不成功,DSU 则发送同期信息给指定的 DGU,激活 DGU 的自动同期功能。DGU 因任何原因退出时都要发送退出报告给 DSU,使 DSU 及时更新孤岛的有功调节能力和可利用的自动同期装置信息。

4.3 再并网与重合闸

孤岛运行是一种暂时的、非正常状态的系统运行方式,故障清除或扰动平息后,孤岛应尽快与系统恢复连接。重合闸可以消除瞬时故障、恢复负荷供电,得到了极为广泛的应用。在包含分散电源的配电网中,再同步和重合闸密切相关。

分层孤岛运行中,再同步和重合闸的功能可以被集成在 DSU 和 DGU 中。联络线故障引起线路跳闸,DSU 检测到变电站级孤岛形成后,通过实时减载使孤岛快速达到稳定运行。系统侧断路器检无压重合,解列点由 DSU 自动检同期并网。检同期失败后,由 DSU 激活 DGU 的自动同期装置,调节解列点处的电压,使其满足同期条件。若分散电源不能承担变电站的主要负荷,DSU 不启动实时减载,直接发送解列信号给下级所有 DGU。确认所有 DGU 解列后,DSU 将变电站级解列点开关重合,由系统给变电站负荷供电。电厂级孤岛的再并网由 DGU 实现。

5 结论

合理的孤岛运行可减小停电面积,提高供电可靠性,便于系统恢复。综合考虑功率平衡原则、分散电源的产权关系、电气分布、地理位置及调度管辖范围等因素,提出一种分层孤岛的运行方式。联络线故障或系统扰动时,先解列为变电站级孤岛,若分散电源不能承担变电站主要负荷时,则解列为多个电厂级孤岛。分层孤岛可以充分利用分散电源的供电能力,运行方式灵活多变。解列后,通过联络线的稳态功率变化计算孤岛内的功率不平衡,实现实时减载,使孤岛尽快达到稳定运行。稳定的孤岛运行可以提高供电质量,并极大增加系统检同期再并网的成功率。还介绍了一种分层分布式控制系统来实现分层孤岛运行。

参考文献:

[1] JENKINS N, ALLEN R, CROSSLEY P, et al. Embedded genera-

tion[M]. London: IEEE, 2000.

- [2] 梁才浩,段献忠. 分布式发电及其对电力系统的影响[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(12): 53-56.
LIANG Cai-hao, DUAN Xian-zhong. Distributed generation and its impact on power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(12): 53-56.
- [3] KUMPULAINEN L, KAUKANIEMI K. Analysis of the impact of distributed generation on automatic reclosing[C]// Proceedings of Power Systems Conference and Exposition. New York: IEEE PES, 2004: 603-608.
- [4] 于立涛,徐鹏. 小电源联网时的几个问题分析[J]. 继电器, 2004, 32(19): 51-53.
YU Li-tao, XU Peng. Analysis of the small power supply system interconnecting[J]. Relay, 2004, 32(19): 51-53.
- [5] Econnect. Assessment of islanded operation of distribution networks and measures for protection. ETSUK / EL / 00235 / REP, DTI / Pub URN 01/1119, 2001[R/OL]. [2006-08-20]. <http://www.dti.gov.uk>.
- [6] 黄静,戴彦,韩连. 从小系统解列事故的分析探讨电网相关问题[J]. 浙江电力, 2005(5): 16-18.
HUANG Jing, DAI Yan, HAN Lian. Discussion of several separation events of local power system in Zhejiang power grid[J]. Zhejiang Electric Power, 2005(5): 16-18.
- [7] 易新,陆于平. 分布式发电条件下的配电网孤岛划分算法[J]. 电网技术, 2006, 30(7): 50-54.
YI Xin, LU Yu-ping. Islanding algorithm of distribution networks with distributed networks[J]. Power System Technology, 2006, 30(7): 50-54.
- [8] SUN Kai, ZHENG Da-zhong, LU Qiang. Splitting strategies for islanding operation of large-scale power systems using OBDD-based methods[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(5): 912-923.
- [9] ZHAO Qiao-chuan, SUN Kai, ZHENG Da-zhong, et al. A study of system splitting strategies for island operation of power system: a two-phase method based on OBDDs[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(11): 1556-1565.
- [10] TOU Hai-bo, VITTAL V, YANG Zhong. Self-healing in power systems: an approach using islanding and rate of frequency decline-based load shedding[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(2): 174-181.
- [11] 国家技术监督局. GB 14285-1993 继电保护和安全自动装置技术规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 1993.
- [12] XU Ding. Optimal load shedding and restoration[D]. Clemson: Clemson University, 2001.
- [13] 魏庆海,鲁顺,范东春,等. 东北电网频率与联络线潮流的关系[J]. 电网技术, 2004, 28(6): 22-25.
WEI Qing-hai, LU Shun, FAN Dong-chun, et al. Relation of frequency in northeast power grid to power flow in tie-line between northeast and north China power grids[J]. Power System Technology, 2004, 28(6): 22-25.
- [14] 袁季修. 电力系统安全稳定控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [15] 杨冠城. 电力系统自动装置原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.

(责任编辑: 李玲)

作者简介:

丁磊(1980-),男,山东临沂人,博士研究生,主要研究方向为分散电源的保护与控制(E-mail: dding8987@163.com);

潘贞存(1962-),男,山东郓城人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统继电保护与自动监控技术。

Splitting and islanding of networked dispersed generators

DING Lei, PAN Zhen - cun, SU Yong - zhi, CONG Wei

(School of Electrical Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China)

Abstract: According to the principle of active power balance, proprietorship of dispersed generators and network topology, the operation concept of power distribution network in hierarchical islands of dispersed generators is presented, which makes the best use of dispersed generators to improve the reliability of power supply. A distribution network with dispersed generators can be split hierarchically into plant islands and substation islands according to load matching when fault occurs. The power imbalance within an island is calculated with the measured power flow change of tieline, and the real-time load shedding is executed with the consideration of island regulation capability. A hierarchically distributed control system is introduced, which integrates the functions of grid splitting, real-time load shedding, re-closing and re-synchronizing via high-speed communication network.

This project is supported by the National Natural Science Foundation of China(50477041).

Key words: dispersed generators; hierarchical islands; real-time load shedding; split