

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190948

面向工业企业电网的有功协调稳定控制系统

聂陆燕¹, 尹玉君¹, 李兆伟¹, 李秋林², 刘福锁¹, 杨玉庭³

(1. 南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司, 江苏 南京 211106; 2. 兴义市电力有限责任公司, 贵州 兴义 562400; 3. 兰州陇能电力科技有限公司, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 在节能减排的背景下, 工业企业电网自备电厂机组和用能设备呈现单机容量不断增大的趋势, 在提升企业能效水平的同时, 也给企业电网的安全稳定运行带来新的挑战。针对工业企业电网面临的功率平衡控制难题, 提出工业负荷参与系统有功平衡的调节方法。并引入快关汽门作为安稳控制的一种手段, 提出有功协调控制系统总体方案和实现路径。通过提升负荷和电源的快速响应能力, 实现工业企业电网正常生产和事故紧急状态下的精细化控制, 为提高企业电网安全稳定运行水平和企业经济效益提供技术支持。在某电解铝企业电网的工程实践表明, 该方法是切实可行的。

关键词: 工业企业电网; 快关汽门; 有功协调稳定控制系统

Active power coordinated stability control system for the industrial enterprise power grid

NIE Luyan¹, YIN Yujun¹, LI Zhaowei¹, LI Qiulin², LIU Fusuo¹, YANG Yuting³

(1. NARI Group Corporation/State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 211106, China;
2. Xingyi Electric Power Co., Ltd., Xingyi 562400, China;
3. Lanzhou Longneng Electric Power Science & Technology Ltd., Lanzhou 730000, China)

Abstract: In the context of energy conservation and emission reduction, self-supplied power plant units and energy-using equipment of the industrial enterprise power grid show a trend of increasing single-unit capacity. While improving the energy efficiency of enterprises, it also brings new challenges to the safe and stable operation of the enterprise power grid. This paper looks at the power balance control problem faced by industrial enterprise power grid, and proposes an adjustment method for industrial load to participate in active power balance and introduces a fast closing valve as a means of stability control. Finally, an overall scheme and implementation path of an active coordination control system are proposed. The rapid response of power and load enables fine control of the industrial enterprise power grid normal production and accident emergency, and provides technical support for improving the safe and stable operation level of the enterprise power grid and enterprise economic benefits. Engineering practice in an electrolytic aluminum enterprise power grid shows that this method is feasible.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFB0902005).

Key words: industrial enterprise power grid; steam turbine fast valve; active power coordinated stability control system

0 引言

随着中国经济的迅猛发展, 互联电网送电规模增大, 各子系统之间的相互联系越来越强^[1-2]。但由于经济和历史等多方面因素, 仍存在多个薄弱的工业企业电网同主网仅有一、两个联络通道弱连接运行。在国家为限制高耗能企业而取消优惠电价后,

一些工业企业电网更倾向于自备电厂供电, 独立运行。中国企业向第三世界投资时, 由于当地基础设施薄弱, 建设的工业企业电网也不得不独立运行。工业负荷大多属于中断供电将会造成较大经济损失甚至人身伤亡的一、二级负荷, 负荷占比重且特性复杂, 大电网的安全稳定控制方法及经验并不都适用于此类电网。

近年来, 孤网的研究主要集中在故障导致局部电网从主网脱离后形成的孤网电源侧特性分析及控

制 [3-6], 微电网中分布式能源的并网控制方法研究 [7-8], 以及并网后的频率特性研究 [9-10], 而对工业企业电网较少涉及。文献[11]提出将负荷侧调节应用到电解铝重载孤网的紧急控制方案中, 但主要局限于网内故障时紧急控制方法对于负荷的分选, 缺少非故障状态下的负荷侧调节和电源侧的研究。

本文针对工业企业电网负荷波动频繁而机组一次调频响应慢等问题, 提出工业负荷参与系统有功功率平衡的调节方法。调动负荷侧适当压/降功率, 电源侧引入快关汽门实现机组快速平滑降功率, 并通过合理配置储能设备提高工业企业电网的动态有功支撑能力及安稳精细控制能力。最后提出面向工业企业电网的有功协调稳定控制系统, 并结合某市电解铝企业电网这一实际案例仿真验证。

1 工业企业电网的特点及控制难点

工业企业电网的负荷(电解铝、铁合金、电弧炉等)多属于高能耗负载, 依靠自备电厂孤网运行相比并网运行可以降低生产成本及节约能源, 很大程度上提高经济效益。因此很多工业企业在探索孤网运行方式, 或受制于当地政策、经济环境, 选择同主网弱连接运行。工业企业电网一般具有较少的火电机组且单机容量大, 并且可能还含有风电、光伏、水电等清洁能源, 机组侧调节性能较差。网内的负荷大多比较密集单一, 对供电系统的安全可靠性要求比较高。此类工业企业电网运行时存在诸多问题:

(1) 工业企业电网独立运行时, 正常生产中负荷波动频繁, 或随机性和波动性强的可再生能源接入, 或工业企业电网孤网运行时发生电源/负荷侧故障, 都很容易引起孤网频率波动 [12-15], 甚至可能导致现场的保护装置或安稳控制装置动作, 引发不必要的损失或事故进一步过大。

(2) 工业企业电网同主网弱连接运行时, 主网对联络通道的交换潮流一般都有严格限制。负荷波动/网内故障导致联络线潮流越限被主网解列或联络线故障将导致工业企业电网转入孤网运行, 网内功率不平衡容易导致系统失稳。而电网内部机组、负荷离散度高, 安稳控制措施很容易造成过切和欠切, 给事故后电网的安全稳定恢复增加难度。

2 有功协调稳定控制系统

2.1 工业负荷参与系统有功功率平衡的调节方法

大电网中, 一般通过切除负荷馈线或精准切负荷 [16-17], 实现紧急状态下的负荷控制功能, 其控制离散性大, 难以适应工业企业电网的功率平衡控制需求。实际上, 不同工业负荷具有不同的控制特点,

部分负荷具备毫秒级快速调节的能力, 可作为工业企业电网非故障状态下有功功率平衡的一种调节手段。如电解铝负荷中, 当电解铝系列需采用小闭环恒流控制时, 若采用晶闸管整流系统, 则可根据控制需要进行平滑连续调节, 一般最多可降系列总负荷的 5%~15%, 300 ms 内完成。若采用二极管整流系统, 则可以离散地控制单台整流机组作为调节负荷进行精细控制(一般最多可切一台整流机组, 否则整个系列因过流保护动作全损失)。另外, 其他类型的工业企业负荷矿热炉、电弧炉等也具有类似的快速调节特性。

通常用 K_s 形容一个电网系统的单位调节功率 [18], 单位为 MW/Hz。但实际系统中发电机能力并不是无穷大, K_s 可由时域仿真粗略求得。工程应用上, 系统的功率不平衡量 ΔP 可由式(1)近似求得。

$$\Delta P = -K_s \times \Delta f \tag{1}$$

针对工业企业电网孤网运行非监测故障时的频率波动, 提出一种工业负荷参与系统有功功率平衡的调节方法。具体控制流程如图 1 所示。

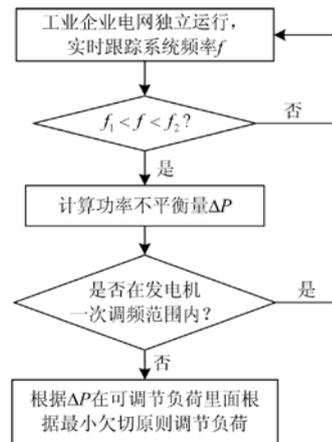


图 1 工业负荷参与有功平衡调节流程图

Fig. 1 Flow chart of industrial load participates in active power balance adjustment

(1) 工业企业电网生产运行时, 由安稳控制系统实时跟踪电网频率。

(2) 若出现辅机故障或负荷波动等事件导致工业企业电网系统频率低于 50 Hz 且介于 f_1 和 f_2 之间, 则根据式(1)计算 ΔP ; 否则继续监测系统频率。 f_1 和 f_2 可根据实际电网特点并结合时域仿真分析确定, 一般, f_1 取值 49.0 Hz 左右, f_2 取值 49.5 Hz 左右。

(3) 若系统的功率不平衡量 ΔP 超出网内火电机组的一次调频能力 P_{fN} , 则根据 ΔP 来切除/调节可切负荷, 否则继续监测系统频率。 P_{fN} 可根据式(2)

粗略算出。

$$P_{N} = 4\% \times \sum_{n=1}^{N-1} P_n \quad (2)$$

式中: N 为网内具备一次调频能力的火电机组台数; P_n 为机组额定功率。

2.2 火电机组快速深度降负荷

一般来说, 工业企业电网中单台发电机组占负荷比例较大, 传统切机稳控措施易造成过控或欠控问题, 为了提高安稳控制的精度, 可以将火电机组快关汽门(快速深度降负荷)用于工业企业电网的有功功率协调稳定控制。常规机组汽门调节速度和调节深度有限, 为了满足工业企业电网发电出力的控制需求, 需对火电机组的机网协调系统(涉及到调速、励磁、旁路及锅炉燃烧控制等系统)开展动态响应测试及改造升级: 汽轮机调速系统配置一体化的转速测量和伺服控制模块, 从转速测量、控制器运算到伺服模块输出的控制周期小于 20 ms; 汽轮机液压系统高、中压多只调节阀采用独立油动机控制, 以避免调门重叠度影响调节性能; 配置可频繁快速动作的高压向空排气装置(PCV 阀)来应对机组快速减负荷时的主蒸汽压力超限问题; 对于多缸汽轮机组, 配置足够容量的旁路, 且旁路和 PVC 阀的总容量能够满足 FCB(Fast Cut Back)之后锅炉稳定燃烧的需求等。改造后, 发电机调节汽门全开、全关的时间由原来的 2~3 s 缩减到 1 s 以内。

为了弥补安稳系统过于依赖故障触发的弱点, 还需安稳控制系统与机网协调系统配合实现快关汽门控制措施。机网协调系统主要应对安稳系统非监测故障形式, 基于企业电网频率响应, 快速决策并实现需要调节的发电机功率, 为此需增加一个快速调频模块(FMS)取代火电机组原有的数字电调控制(Digital electro-hydraulic control system)模块(老旧的火电机组 DEH 性能一般难以满足快速控制的需求)。FMS 采用高性能硬件, 整个运算周期 20 ms, 并整合一次调频和二次调频(AGC)的功能。当工业企业电网孤网运行时的负荷波动引起频率大幅值偏差时, 由于安稳系统监测不到电网故障, FMS 会实时跟踪转子转速偏差调动一次调频有差调节控制回路和二次调频无差调节控制回路协调配合, 实现转速的无差调节。

当电网发生故障造成大负荷损失或同主网的联络线潮流外送越限时, 安稳系统会根据故障/越限信息, 发送火电机组快降出力指令和快降深度信息给机网协调系统, FMS 将快降出力信息通过阀门流量函数模块和阀门管理模块计算输出阀位调节信

号, 并经过伺服模块和油动机转化为阀门开度调整进入机组的蒸汽容量和压力, 实现机组出力的快速下降。这个环节讲究快速, 但略保守, 后面还需 FMS 根据机组转速的恢复情况, 协调一次调频和二次调频回路配合调节实现频率的进一步恢复。整个流程如图 2 所示。

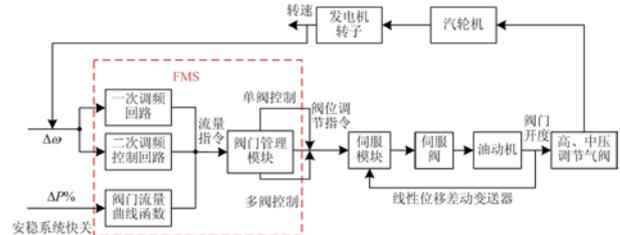


图 2 快关汽门流程框图

Fig. 2 Flow chart of steam turbine fast valve

2.3 储能设备参与系统有功功率调节

工业企业电网的电源及负荷颗粒度大给安稳的精确控制带来难度, 可适当引入储能设备作为提高系统运行稳定性、调整频率、补偿负荷波动的一种手段^[19-22]。针对储能电站通信结构复杂多样、通信速度和通信可靠性参差不齐的局面, 在实际工程应用中, 通常会配置一个专门的储能快速功率控制装置作为安稳控制系统主站和储能功率变换系统(Power Conversion System, PCS)的接口装置, 如图 3 所示。快速功率控制装置向上通过专用通信机箱和专用通道将 PCS 上传的储能出力状态及功率值、可放电容量和可充电容量发送给安稳控制主站, 接收主站下发的储能电站功率调整指令并发送给 PCS 执行。储能系统的毫秒级响应及功率翻转能够减小安稳控制的颗粒度, 加速系统恢复到稳定状态。

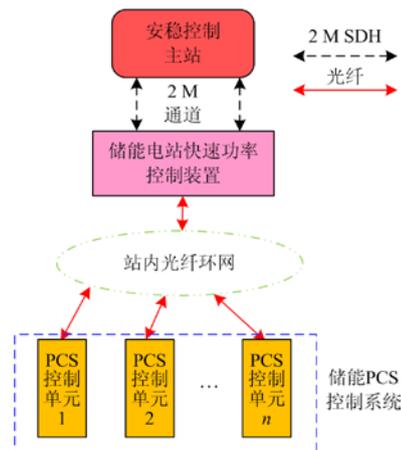


图 3 安稳控制主站同储能电站通信示意图

Fig. 3 Schematic diagram of communication between the main station and the energy storage station

2.4 有功协调稳定控制系统

综上所述, 提出面向工业企业电网的有功协调稳定控制系统, 由机网协调系统和安全稳定控制系统组成, 如图 4 所示; 通信框架如图 5 所示。

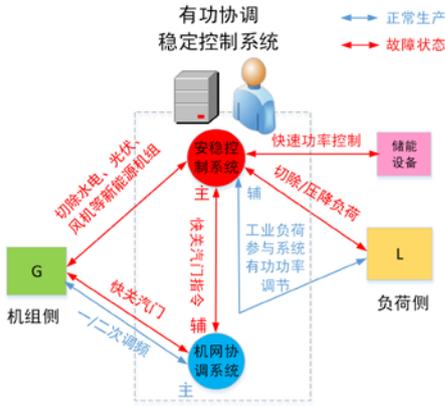


图 4 有功协调稳定控制系统示意图

Fig. 4 Active power coordinated stability control system

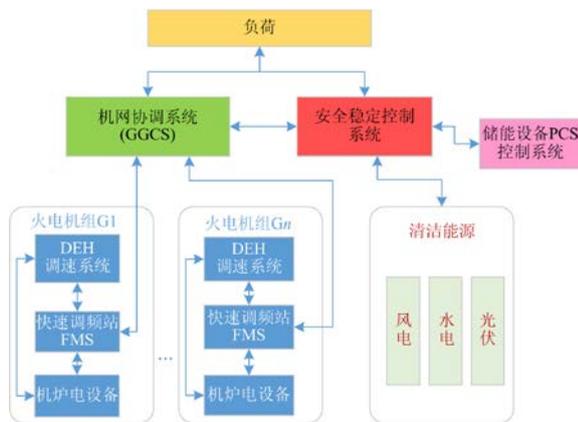


图 5 系统通信示意图

Fig. 5 System communication diagram

(1) 正常生产(或发生安稳系统无法察觉的故障)时, 由机网协调系统基于系统频率调节机组出力, 安稳控制系统基于系统频率协调负荷侧参与网内功率调节, 维持工业企业电网有功功率平衡。

(2) 针对各种故障状态下的热稳定、频率稳定、联络线越限问题, 由安全稳定控制系统主导, 机网协调系统配合实现工业企业电网安全稳定地快速恢复。

当出现负荷侧故障导致网内功率过剩或联络线潮流外送越限时, 安稳系统根据实时监测到的负荷变化量或越限量, 查询策略表, 优先切除水电、风机及光伏等新能源机组, 并发送降火电机组出力指令给机网协调系统, 由机网协调系统协调多台火电机组快速减负荷。

当出现机组侧故障导致网内功率不足或联络线潮流受入越限时, 安稳系统根据策略表查找最优可切/压负荷, 通过切/压负荷实现网内功率平衡或联络线潮流降到限额内, 恢复电网安全稳定运行。

安稳控制系统还根据储能 PCS 控制系统上传的运行状态, 发送充放电指令给储能设备执行, 提高安稳控制的精确度和可靠性。

(3) 在安稳控制装置拒动/失灵^[23]或极端严重故障工况下, 由本地控制装置动作完成, 主要包括低频、低压减载, 高周切机和失步解列装置。

3 仿真算例

以某电解铝企业电网为基础, 构造仿真算例。网内有 A 火电厂(G3、G4, 2×300 MW)、B 火电厂(G1、G2, 2×360 MW)、水电站(8×57 MW)等三个电源点, 以及电解铝厂(二极管整流系统, 系列负荷 377 MW)、铁合金厂(矿热炉、精炼炉等, 负荷 155 MW)两个负荷点, 水电站与主网有一个同杆双回线的弱连接通道, 如图 6 所示。

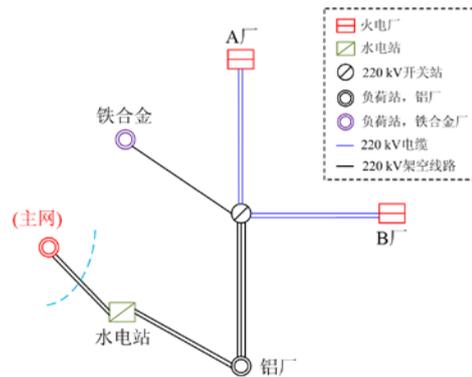


图 6 XX 市工业企业电网框图

Fig. 6 XX city industrial enterprise power system

考虑负荷切除需求, 电解铝系列负荷可切量为单个整流变 60 MW 或整个系列 377 MW, 切除时间 500 ms。安稳控制装置通过跳开 35 kV 及 6 kV 馈线的方式切除铁合金厂负荷, 颗粒度最大 15 MW, 切除时间 200 ms。

3.1 孤网运行时的辅机故障

考虑枯水期孤网运行方式, 水电出力为 0 MW, G3 出力 188 MW, G1、G2 机组并网(出力为 224 MW×2)。0 s, G1 机组给水泵故障, 10 s 内出力降至 170 MW, 不考虑任何措施, 系统暂态频率在 10 s 时下降至 49.5 Hz, 最低降至 49.27 Hz (17.7 s 时)。如图 7 所示。

考虑工业负荷参与系统功率调节, 该系统的单位调节功率 K_g 为 75 MW/Hz, 则

$$\Delta f = -0.5 \text{ Hz}$$

$$\Delta P = -K_s \times \Delta f = 37.5 \text{ MW} > P_{N}$$

10.1 s 切除铁合金厂的矿热炉负荷 37 MW, 系统频率快速恢复至 49.9 Hz。由图 7 看出, 对于安稳系统无法察觉到的故障, 通过跟踪频率适当调节工业负荷参与系统功率调节, 系统安全裕度有很大程度提高。

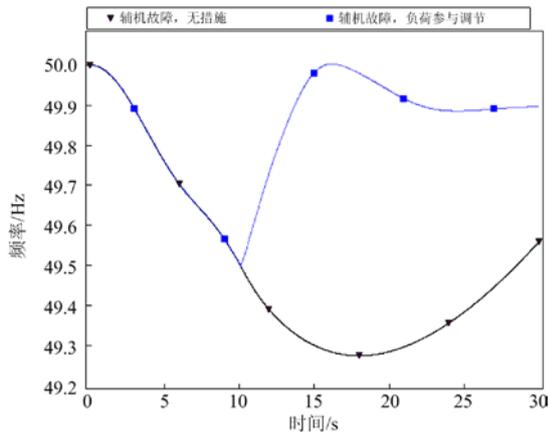


图 7 辅机故障, 负荷参与调节前后, 系统频率曲线

Fig. 7 System frequency curves when the auxiliary machine fails and the load participates in the power adjustment

3.2 水电送出通道故障系统转入孤网运行

考虑该企业电网联网运行, 联络断面几无功功率交换, 水电出力为 275 MW, G3 出力 150 MW, G1 出力 180 MW。考虑水电送出通道: 水电站-铝厂双回线故障, 损失全部水电机组, 系统频率失稳。分别考虑切除铁合金全部及电解铝单个整流变共 215 MW 负荷、切除电解铝整个系列负荷 377 MW、切除电解铝整个系列再补切 G3 机组三种安稳控制措施, 系统频率如图 8 所示。可以看出, 当联络断面故障断开, 工业企业电网转入孤网运行, 网内功率不平衡很容易导致系统失稳。而机组、负荷不具备连续快速可调特性又给故障后的紧急控制增加难度。尤其是电解铝二极管整流系统负荷不能分批次切除, 造成严重欠切或过切, 无法满足可靠控制要求, 系统的安全稳定无法快速恢复。

考虑快关汽门, 切除电解铝整个系列负荷 377 MW, 同时等比例快降 G3、G1 机组出力 45 MW、55 MW, 快降出力时间为 300 ms, 系统暂态频率最低可至 49.68 Hz, 稳定在 50.06 Hz, 如图 9 所示。G3、G1 机组机械功率如图 10 所示。快关汽门通过对机组侧出力的精确控制, 能够快速实现网内功率平衡, 减少频率反复波动的同时也避免了火电机组被切除的较长恢复时间和较大经济代价。

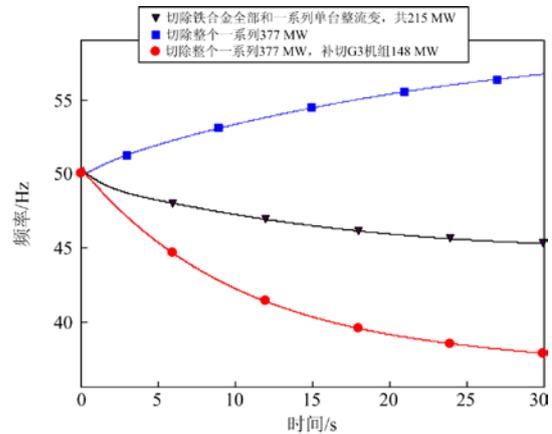


图 8 考虑三种安稳控制措施, 系统频率曲线

Fig. 8 System frequency curve considering three safety and stability control measures

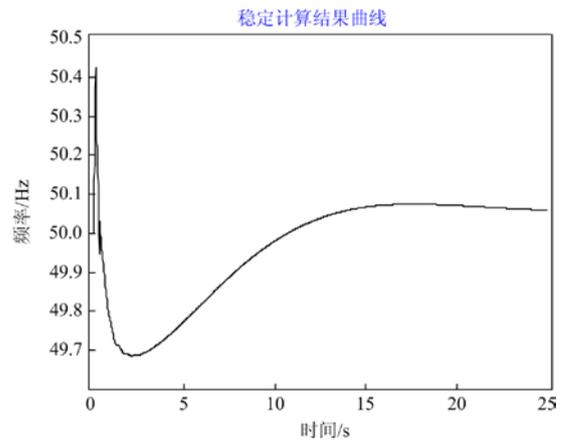


图 9 考虑快关汽门, 系统频率曲线

Fig. 9 System frequency curve considering steam turbine fast valve

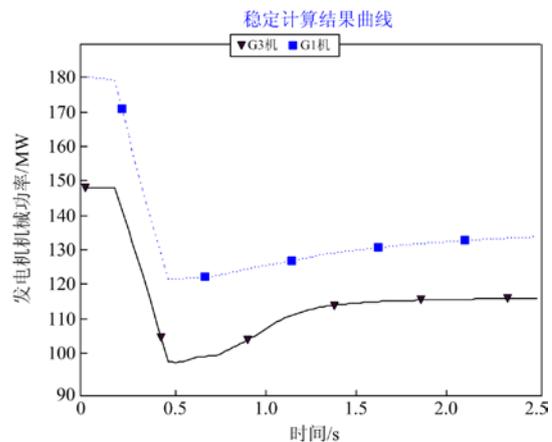


图 10 考虑快关汽门, 机组机械功率曲线

Fig. 10 Unit mechanical power curves considering steam turbine fast valve

3.3 其他算例

考虑其他电源侧故障损失机组出力，若因负荷离散度太大做不到功率切平时，可过切负荷再补压剩余网内火电机组出力达到网内功率平衡；对于负荷侧故障，可根据损失负荷量欠切水电机组，再结合不足量压火电机组出力。通过快关汽门实现机组侧出力的精确控制，解决了负荷离散度大带来的控制难点，实现了工业企业电网有功功率平衡的精确控制。

4 工程案例及应用情况

4.1 工程案例 1

2019 年贵州某孤网因工作人员误操作引起线

路接地事故，孤网电压骤降，下游用电负荷突用。故障前孤网水电大发，火电机组只有#1 机并网(额定 350 MW，实际出力 166 MW)。安稳装置并没有监测到 35 kV 负荷馈线，且出于可靠性考虑也并不考虑负荷突降等负荷波动情况。机网协调控制系统自动跟踪系统频率，调整机组出力，经 2 min 52 s，机组出力从 166 MW 降至最低 37.6 MW，过程中孤网频率最高升至 50.3 Hz。故障解除后，下游用电负荷恢复，机组出力逐步回升到 141 MW，孤网恢复稳定运行。整个事故过程历时 15 min 左右，如图 11 所示。通过跟踪系统频率，机网协调系统快速调节机组出力，适应下游负荷变化，维护系统稳定运行。

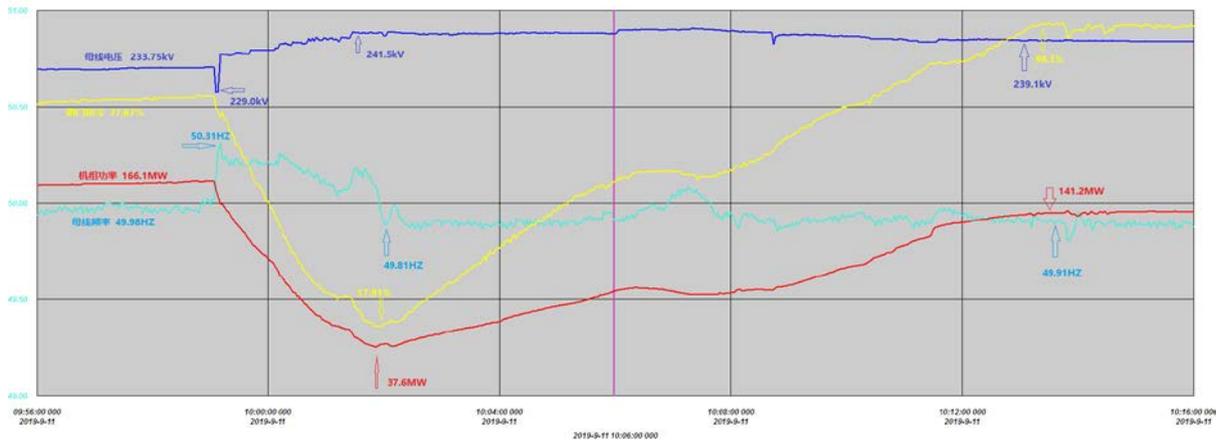


图 11 #1 机组负荷及转速曲线图

Fig. 11 Output and speed curve of #1 unit

4.2 工程案例 2

受雷雨天气影响，2016 年某石化电网上级变电站与国网系统解列。因解列之后的区域电网存在功率缺额，系统频率降低，该石化电网 35 kV 联络一线并网开关低频解列动作，进入孤岛运行，如图 12。

解列前，该子系统只有#4 机(抽凝机组，额定功率 60 MW)带负荷通过联络一线并网，联络线交换潮流约 5 MW，外送。#4 机转速 2 999.5 rmp(49.99 Hz)，出力 51 MW。该石化系统的控制策略是：联络线开断时，若事故前联络线潮流外送主网，则由机网协调系统降机组出力。上级电站解列之后，#4 机转速最低值 2 914 rpm(48.6 Hz)，机网协调系统调节机组出力，最大至 61.7 MW。石化系统解列后，孤网频率缓慢恢复。机组转速 15 s 内恢复至 3 000±2 rpm，出力降至 47 MW，且无超调现象，如图 13。通过合适的解列和控制策略，避免了外部电网故障波及到网内，保障了电网的安全稳定运行。

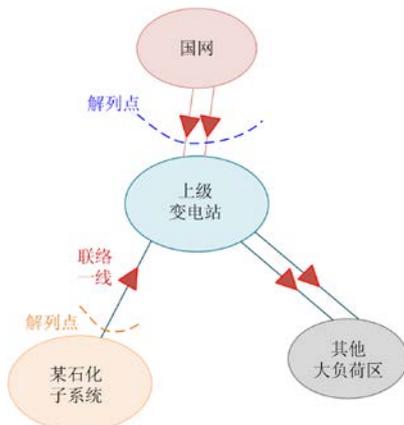


图 12 某石化电网系统简化框图

Fig. 12 Block diagram of a petrochemical grid system

目前有功协调稳定控制系统已经成功应用于贵州某地方电网、山东某石化电网、内蒙某地方电网、印尼某水泥厂及镍铁厂等。结合工程案例及应用情况可以得出，有功协调稳定控制系统能够很好地实现工业企业电网故障后快速恢复安全稳定，保障工业企业电网的安全可靠供电，提高工业企业电网生产的经济性。

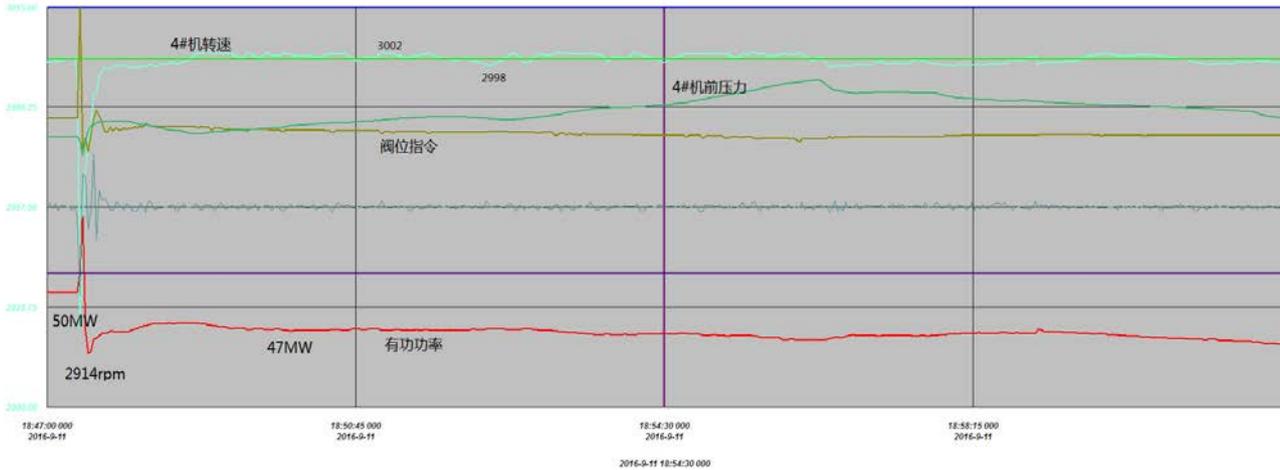


图 13 #4 机组负荷及转速曲线图

Fig. 13 Output and speed curve of #4 unit

5 结论

工业企业电网的主要安全稳定风险是由大电网运行时的负荷控制转变为孤网运行时的频率控制^[5]。

(1) 正常生产时,发电机组调速系统具有快速高效的调节能力,不同类型工业负荷能够参与网内功率平衡调节,系统的安全稳定裕度大幅提高。

(2) 发生故障时,工业企业电网的控制方法不再局限于传统的切机、切负荷措施,而是要求机网协调系统与安稳控制系统配合实现火电机组快降出力和切/压负荷的协调控制,解决了传统控制手段离散性大、控制难度高的问题。

(3) 算例及工程案例都验证了有功协调稳定控制系统能够适用于同主网弱连接运行和独立运行的工业企业电网。

有功协调稳定控制系统不但提高了安稳控制的精确性和可靠性;也可避免切除火电机组,尽可能多地保留系统的旋转备用;更给国家正在大力推广的火电机组深度调峰提供技术依据。在节能减排的背景下大幅节约工业企业生产成本,提高其经济效益。下一步将深入研究储能设备的功率优化控制方法,进一步完善有功协调稳定控制系统。

参考文献

- [1] 孙云涛, 宋依群. 基于调峰能力评估的省间调峰互济交易模式[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(4): 86-91. SUN Yuntao, SONG Yiqun. Peak load regulation trading mode for trans-provincial aid based on evaluation of system regulation capacity[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4): 86-91.
- [2] 张文亮, 周孝信, 印永华, 等. 华北-华中-华东特高压同步电网构建和安全性分析[J]. 中国电机工程学报,

- 2010, 30(16): 1-5.
- ZHANG Wenliang, ZHOU Xiaoxin, YIN Yonghua, et al. Composition and security analysis of "North China-Central, China-East China" UHV synchronous power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(16): 1-5.
- [3] 黄杨, 张毅威, 闵勇, 等. 水电群孤网后的安全稳定特性及控制策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(9): 1-5. HUANG Yang, ZHANG Yiwei, MIN Yong, et al. Security and stability characteristics and control strategies for isolated hydropower groups[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(9): 1-5.
- [4] 王家胜, 邓彤天, 冉景川, 等. 火电机组在孤(小)网中的启动及运行方式研究[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(21): 102-106. WANG Jiasheng, DENG Tongtian, RAN Jingchuan, et al. Start-up and operational mode of fossil plant units in an isolated (little) power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(21): 102-106.
- [5] 叶健忠, 邹俊雄, 龙霏, 等. 地区电网火电机组孤网运行频率控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(7): 123-128. YE Jianzhong, ZOU Junxiong, LONG Fei, et al. Research on frequency control strategy for isolated grid operation of thermal power unit in regional power network[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(7): 123-128.
- [6] 王一振, 马世英, 王青. 电力系统孤网高频问题研究现状和发展趋势[J]. 电网技术, 2012, 36(12): 165-169. WANG Yizhen, MA Shiying, WANG Qing. Present status and developing trend of research on over frequency in isolated power grid[J]. Power System Technology, 2012, 36(12): 165-169.
- [7] 时珊珊, 鲁宗相, 闵勇. 微电网孤网运行时的频率特性分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(9): 36-41. SHI Shanshan, LU Zongxiang, MIN Yong. Analysis on frequency characteristics of islanded microgrid[J].

Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(9): 36-41.

[8] 黄伟, 牛铭. 微电网非计划孤岛网控制策略分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(9): 42-46.
HUANG Wei, NIU Ming. Analysis on non-planned isolated control strategy for microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(9): 42-46.

[9] 刘洋, 王倩, 龚康, 等. 基于超导储能系统的微电网频率暂态稳定控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(15): 101-108.
LIU Yang, WANG Qian, GONG Kang, et al. Transient stability control strategy of microgrid frequency based on SMES[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(15): 101-108.

[10] 袁虎玲, 刘福锁, 侯玉强, 等. 一种考虑备用且与紧急控制相协调的风机高频保护整定方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(7): 77-83.
YUAN Huling, LIU Fusuo, HOU Yuqiang, et al. A tuning method for high-frequency protection program of fans considering emergency reserve and coordination with emergency control[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(7): 77-83.

[11] 王玉, 许和平, 王怀明. 电解铝孤网紧急控制优化方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(21): 121-126, 135.
WANG Yu, XU Heping, WANG Huaiming. Emergency control optimization measures for isolated power grid with heavy load of electrolytic aluminum[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(21): 121-126, 135.

[12] 黄宗君, 晃剑, 李兴源, 等. 贵阳南部电网高频问题与超速保护器仿真研究[J]. 电网技术, 2007, 31(15): 26-32.
HUANG Zongjun, CHAO Jian, LI Xingyuan, et al. High frequency phenomenon caused by fault occurred in southern part of Guiyang of Guiyang power grid and simulation of overspeed protection controller[J]. Power System Technology, 2007, 31(15): 26-32.

[13] ZEINELDIN H H, BHATTACHARYA K, EI-SAADANY E F, et al. Impact of intentional islanding of distributed generation on electricity market prices[J]. IEEE Proceedings of Generation, Transmission and Distribution, 2006, 153(2): 147-154.

[14] BOWER W, ROPP M. Evaluation of islanding detection methods for photovoltaic utility[R]. International Energy Agency, 2002.

[15] 周志平, 孙新良, 付晨鹏, 等. 电力系统孤网运行动态特性试验[J]. 电网技术, 2008, 32(2): 78-81.
ZHOU Zhiping, SUN Xinliang, FU Chenpeng, et al. Insular power system dynamic characteristic examination research[J]. Power System Technology, 2008, 32(2): 78-81.

[16] 董希建, 罗剑波, 李雪明, 等. 交直流混联受端电网频率紧急协调控制技术及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(18): 59-66.
DONG Xijian, LUO Jianbo, LI Xueming, et al. Research and application of frequency emergency coordination and control technology in hybrid AC/DC power grids[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(18): 59-66.

[17] 汤涌, 郭强, 周勤勇, 等. 特高压同步电网安全性论证[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 97-104.
TANG Yong, GUO Qiang, ZHOU Qinyong, et al. Security evaluation for UHV synchronized power grid[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 97-104.

[18] 单渊达. 电能系统基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.

[19] 张文亮, 丘明, 来小康. 储能技术在电力系统中的应用[J]. 电网技术, 2008, 32(7): 1-9.
ZHANG Wenliang, QIU Ming, LAI Xiaokang. Application of energy storage technologies in power grid[J]. Power System Technology, 2008, 32(7): 1-9.

[20] 张国驹, 唐西胜, 齐智平. 超级电容器与蓄电池混合储能系统在微网中的应用[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(12): 85-89.
ZHANG Guoju, TANG Xisheng, QI Zhiping. Application of hybrid energy storage system of super-capacitors and batteries in a microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(12): 85-89.

[21] 修晓青, 李建林, 惠东. 用于电网削峰填谷的储能系统容量配置及经济性评估[J]. 电力建设, 2013, 34(2): 1-5.
XIU Xiaoqing, LI Jianlin, HUI Dong. Capacity configuration and economic evaluation of energy storage system for grid peak load shifting[J]. Electric Power Construction, 2013, 34(2): 1-5.

[22] MAGDY G, SHABIB G, ELBASET A A, et al. Optimized coordinated control of LFC and SMES to enhance frequency stability of a real multi-source power system considering high renewable energy penetration[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(4): 407-421. DOI: 10.1186/s41601-018-0112-2.

[23] 罗剑波, 董希建, 崔晓丹, 等. 关于大型安全稳定控制系统可靠性研究的探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 65-72.
LUO Jianbo, DONG Xijian, CUI Xiaodan, et al. Discussion on reliability of large scale security and stability control system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 65-72.

收稿日期: 2019-11-05; 修回日期: 2020-01-25

作者简介:

聂陆燕(1986—), 女, 通信作者, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统安全稳定分析与控制; E-mail: nieluyan@sgepri.sgcc.com.cn

尹玉君(1978—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统安全稳定分析与控制。E-mail: yinyujun@sgepri.sgcc.com.cn

(编辑 魏小丽)