

DOI: 10.7667/PSPC161692

## 基于集中校核与分散控制的备自投系统

邹德虎<sup>1,2,3</sup>, 徐希<sup>1,2,3</sup>, 闪鑫<sup>1,2,3</sup>, 吴昊<sup>4</sup>, 苏大威<sup>5</sup>, 徐春雷<sup>5</sup>

(1. 南瑞集团公司(国网电力科学研究院), 江苏 南京 211106; 2. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 211106; 3. 智能电网保护和运行控制国家重点实验室, 江苏 南京 211106; 4. 国网江苏南通供电公司, 江苏 南通 226006; 5. 国网江苏省电力公司, 江苏 南京 210024)

**摘要:** 备自投对保障电力系统供电可靠性非常重要, 站内备自投孤立运行, 缺乏电网全局信息, 不利于充分发挥备用电源投入功能。提出基于集中校核与分散控制的备自投系统, 该系统包括监视分析、在线投退和离线校核 3 个方面的功能。同时介绍了与备自投系统技术实施相关的若干关键技术, 包括备自投模型、基于风险评估的备自投投退策略、数据可靠性校核和网络备自投控制校核。应用实例表明, 备自投系统可以综合全网信息, 降低电网运行风险。

**关键词:** 备自投; 能量管理系统; 地区调度; 校核

### Centralized checking and decentralized control automatic switching system

ZOU Dehu<sup>1,2,3</sup>, XU Xi<sup>1,2,3</sup>, SHAN Xin<sup>1,2,3</sup>, WU Hao<sup>4</sup>, SU Dawei<sup>5</sup>, XU Chunlei<sup>5</sup>

(1. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China; 2. NARI Technology Development Co., Ltd., Nanjing 211106, China; 3. State Key Laboratory of Smart Grid Protection and Control, Nanjing 211106, China; 4. State Grid Nantong Power Supply Company, Nanjing 226006, China; 5. State Grid Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210024, China)

**Abstract:** Automatic switchover device is very important to ensure the reliability of the power system. However, the equipment is deployed in substation construction and lack of global information grid, which is not conducive to give full play to the standby power input function. This paper proposes to establish the centralized checking and decentralized control automatic switchover system. The system includes three functions, i.e. monitoring and analysis, online switching, offline check. At the same time, this paper introduces several key technologies related to the system, including the modeling of automatic switchover, control strategy based on risk assessment, data reliability and control check of power network automatic switchover system. Application examples show that the centralized checking and decentralized control automatic switchover system can integrate the whole network information and reduce the risk of power grid operation.

**Key words:** automatic switchover system; energy management system; regional dispatching; check

## 0 引言

备自投装置可以在故障后失去工作电源的情况下, 自动投入备用电源。对保证电网供电可靠性发挥了重要作用。

站内备自投运行维护都是相互孤立的, 不能充分利用全局信息。造成不能充分发挥备用电源投入

功能, 特别是链式串行供电中间变电站失压时, 站内备自投无法恢复供电。为解决该问题, 文献[1-2]提出在主站 EMS 系统建设广域备自投系统。在应用的过程中, 发现利用 EMS 系统代替站内备自投动作是不实用的, 真正有现场实用价值的是对串行供电网络的恢复控制。备自投系统在 EMS 集中控制的思路脱离工程实际, 本文提出的备自投系统在常规接线方式下, 保留站内备自投分散控制的现状。

在文献[1-2]的基础上, 专门针对串行供电网络等特殊接线的备用投入控制, 区域(网络)备自投技

**基金项目:** 国家电网公司科技项目“大型地区电网运行风险分析及应急处置关键技术研究”

术<sup>[3]</sup>得到进一步发展,南瑞科技<sup>[4]</sup>、东方电子<sup>[5]</sup>、南瑞继保<sup>[6]</sup>等厂家都有各自成熟的网络备自投产品。网络备自投只能解决特定接线下的备用电源投入问题,只能应用于较小的范围。本文所设计的备自投系统将监视全部地区电网,并且将网络备自投纳入备自投系统,作为其中一部分继续发挥作用。

在负荷较重的情况下,站内备自投动作后有可能造成设备过载,反而增加了运行风险。为此,站内备自投有“和电流闭锁”、联切负荷等解决方案<sup>[7]</sup>,但这些方案只能避免站内设备的过载,无法判断站外设备的过载。同时传统解决方案只能预先制定,运维工作量很大。备自投远程投退可以利用全网信息,更加灵活,虽然目前有少量研究<sup>[8-9]</sup>,但实用性不理想。本文提出了更具实用性的投退方案。站内备自投的安装配置、备自投动作时限配合等完全依靠保护和方式人员预先制定。随着运行方式的改变,有可能出现备用缺失和动作时序配合不合理等情况。本文所提出的备自投系统,将提供监视和校核功能,帮助运维人员发现上述问题。

备自投系统收集子站备自投的上传信息,结合 EMS 自身的各类信息,统一协调。当然,增加变电站之间的通道联系、建设局部的备自投系统也是可行的<sup>[10-11]</sup>,但设备改造成本较高,不具备普遍意义。EMS 具备与本调度所管辖所有变电站的通道联系,可以减少重复建设,成本只有软件开发和软件维护。备自投系统遵循集中校核、分散控制的设计原则。因为 EMS 基础数据实时性不如变电站数据,尤其是遥测。因为远动终端在遥测变化达到门槛时才上送,必然存在延时。因此备自投系统不会代替站内备自投进行控制,而是利用 EMS 信息更全面的优势,对站内备自投集中校核,利用校核的结果对备自投实施远程投退;同时整合全网信息对网络备自投的控制进行校核,增加控制可靠性。故障后自动投入备用电源,一般情况下仍然由分散的变电站备自投装置来完成(除了串行供电等特殊接线方式)。

自 2013 年起国调开展了电网运行基础数据的整治与行业对标<sup>[12]</sup>,南网对基础数据质量也非常重视。目前各地区调度的基础数据质量普遍达到较高水平,具备了在 EMS 建设备自投系统的条件。

## 1 基本架构和功能

备自投系统的基本架构如图 1 所示。

备自投系统作为 EMS 的一个应用模块,由备自投监控校核软件、备自投建模和网络备自投 3 部分构成。其中备自投建模软件支持对站内备自投的自动建模和人工建模,但建立后的模型需要与站内

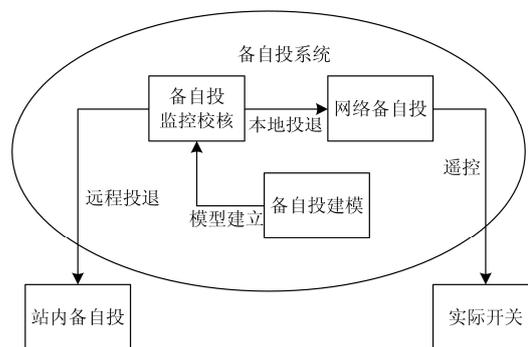


图 1 备自投系统的基本架构

Fig. 1 Basic framework for the automatic switchover system

备自投采集和投退控制点号关联起来,才可以具备控制功能。备自投监控校核软件除了监视校核外,还可对网络备自投和站内备自投进行投退。网络备自投的技术目前已经比较成熟,但动作后过载闭锁不再由自身完成,而是由备自投监控校核软件通过投退来实现。

备自投系统有 3 个基本功能,分别为监视分析、在线投退和离线校核。

备自投系统的监视分析包括两个方面:

1) 稳态情况下的监视分析,重点是对备自投运行相关风险的计算与在线展示。包括备自投退出造成的失负荷风险;以及备自投投入可能造成的越限风险。值得注意的是,如果尽可能避免设备越限,退出尽可能多的备自投,越限风险降低,但失负荷风险会升高。这两种风险是相关的,需要同时监视,并取得平衡。

2) 故障情况下的监视分析,重点是对故障后备自投动作情况的监视。包括:故障后小电源孤岛识别,在站内备自投较长时间不能动作,孤岛的供电质量又不能满足的情况下,提出控制策略建议联切小电源开关。同时对站内备自投动作正确或者拒动的情况进行识别和监视。

在线投退包括紧急情况下的投退,主要指稳控装置动作后,需要闭锁相关的站内备自投和网络备自投。本文仅讨论正常运行情况下站内备自投的投退控制。

在线投退是在监控分析所得到风险指标的基础上,远程投入或退出站内备自投,控制对象是备自投投退软压板;同时可以在 EMS 系统投入或退出网络备自投。对站内备自投通过远程遥控通道,对网络备自投通过 EMS 中的消息总线。

离线校核指的是在预想运行方式下对备自投的安装配置、动作时序配合等进行校验。通过校核,可以发现预想故障时某些设备失电后无备用,这种

情况需要增加站内备自投或网络备自投。同时，离线校核可以发现某些情况下备自投动作时序配合不合理。例如，某备自投已经恢复负荷供电，之后又有新的备自投动作，其新的备自投动作未恢复任何负荷，是无意义的。这种情况需要重新整定备自投动作时间。

备自投系统对站内备自投的监视、投退和离线校核等功能，均不是代替站内备自投进行故障后投入备用电源。主要是发挥主站信息全面的优势，进行集中校核，使得电网分散的备自投装置更好地发挥作用。站内备自投的核心控制功能仍然不变，仍然分散在各个变电站中。

## 2 关键技术研究

### 2.1 备自投模型

虽然备自投装置的厂家众多，但基本功能是一致的。无论站内备自投的逻辑多么复杂，其基本功能都可以用统一的模型来表述，并进一步进行分析。在备自投模型的基础上，调度员潮流、静态安全分析和风险评估等高级应用分析软件都可以考虑备自投动作的影响。备自投模型是备自投系统实现分析功能的基础。

文献[13]已经对备自投模型及其分析方法做了比较详细完善的论述，但仍存在以下局限性：1) 描述站内备自投多电源备用时存在“组合爆炸”现象；2) 备自投时序配合只考虑备自投本身的动作时间，而不是实际开关的变位时间；3) 无法考虑站域备自投不按照动作时间配合的方式<sup>[10]</sup>。

例如，图 2 为某典型 110 kV 变电站简化一次接线图。其中 110 kV 部分需要安装多备用备自投。按照文献[13]的建模方法，随着运行方式的变化，备自投模型都需要相应修改，且这样的组合方式非常多，存在“组合爆炸”的现象，维护模型工作量很大。例如假定特殊情况下图 2 中的母联 5DL 变为合位，备用电源变为进线 2 和进线 4，假定进线 2 优先级更高，则母线失电后优先投入进线 2。又例如假定进线 4 线路检修，进线 3 失电后投入备用的设备也将发生变化，变为合上母联 5DL，备用电源为 A 母线。

改进的方法如下：针对类似于图 2 的多备用方式，模型中只维护备用优先级，不维护具体的动作逻辑。分析时根据当前变电站运行方式和拓扑关系自动生成详细模型。

文献[13]在分析备自投时序配合时，未考虑实际开关的变位时间。以图 2 为例，假定进线 1 失电，备自投需要投入备用进线 2。备自投动作时间整定

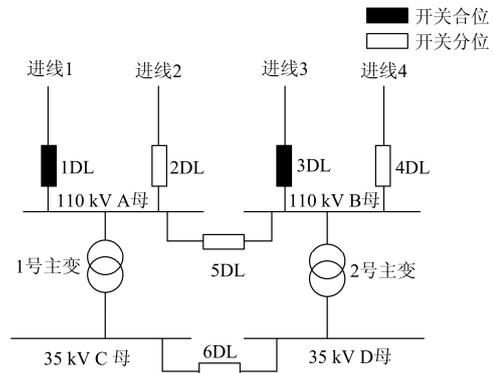


图 2 110 kV 变电站接线方式

Fig. 2 110 kV substation connection mode

为 2 s，完成控合开关 2DL 的时间为 2.5 s；假定 35 kV 备自投动作时间整定为 2.2 s，完成开关控制的时间为 2.5 s。按照文献[13]的分析，只有 110 kV 备自投动作。但实际上，110 kV 备自投和 35 kV 备自投都动作，与理论分析结果不一致。

分析备自投时序配合的流程改进如下。

建立开关动作序列，序列按照时间顺序排列开关动作情况，开关动作序列中的数据可以在分析过程中修改。备自投分析过程基于从 0 s 开始的虚拟时钟。

1) 分析故障后备自投动作情况。如果有备自投动作，则在开关动作序列增加变位开关及其相应的虚拟变位时间。

2) 虚拟时钟向后移动，当遇到开关变位记录时，进行一次局部拓扑。

3) 局部拓扑完成后，再次分析备自投动作情况。此时可能部分备自投因为电源已经恢复供电而取消动作状态，这时需要把相应的开关变位记录从开关动作序列删除。

虚拟时钟在分析过程中不断增加，直到预先设定的窗口(例如 30 s)。最后返回预想故障下的备自投动作情况和开关变位序列，完成分析。

文献[10]所介绍的站域备自投，站内不同电压等级的备自投不再按照动作时间来配合，而是直接按照逻辑来配合。针对这种方式，备自投分析需要做下列改进：

站域备自投设置统一的动作时间，分析时如果多个电压等级备自投同时具备动作条件，且优先级最高的备自投可以恢复站内全部负荷，则出口动作并闭锁其余备自投，否则开放次级优先的备自投动作。

### 2.2 基于风险评估的备自投投退策略

备自投投退控制策略目前研究较少。文献[8]的

方法是通过直接退出备自投, 来保证备自投的不必要动作。但是与现场实际差距较大, 现场是以时序配合的方式, 保证上级备自投拒动时下级备自投还可动作。文献[9]的方法需要反复试探求解潮流, 计算量过大, 不便于现场实施。

本文提出基于风险评估的启发式备自投投退策略, 计算量小容易实现。策略是基于  $N-1$  扫描基础上的, 每个  $N-1$  故障对应一种场景。首先假定备自投全部投入。策略分为两步, 首先仅考虑站内设备过载(包括变压器和线路)的风险, 退出部分备自投; 第二步在此基础上, 从系统角度考虑, 分析站外设备过载风险, 进一步退出部分备自投。

以图 2 的 35 kV 备自投为例介绍第一步站内备自投投退方法。为便于说明问题, 假定初始情况下两台主变所带负荷功率是一样的。

考虑 1 号主变退出, 备自投动作, 所有负荷转移至 2 号主变。如果备自投退出, 此种情景下 1 号主变所带负荷丢失, 风险将会是失负荷, 且风险大小与失负荷量成正比。判断失负荷风险的公式为

$$R_{\text{LOST}} = 0.5kS \quad (1)$$

式中:  $k$  为综合  $N-1$  故障概率和单位功率经济损失的系数;  $S$  为两台主变功率相加的总和功率。

如果备自投投入, 则 2 号主变面临越限风险, 越限风险的判断公式为

$$\begin{aligned} R_{\text{OVER}} &= 2k(S - 0.9S_0k') \\ 0.9S_0k' < S < 0.9S_0k' + 0.5S_0 \\ R_{\text{OVER}} &= kS \\ S &> 0.9S_0k' + 0.5S_0 \end{aligned} \quad (2)$$

式中:  $S_0$  为 2 号主变绕组额定功率;  $k'$  为主变油温调整系数, 本文简化为  $k'=1$ 。公式的意义为: 当功率超过额定功率 0.9 倍时, 开始面临越限风险; 当功率超过额定功率 1.4 倍时, 则主变退出运行, 相当于丢失全部负荷。为简化计算, 风险与总和功率直接设置为线性关系。

当  $R_{\text{OVER}} > R_{\text{LOST}}$  时, 采取退出备自投措施, 图 3 可以直观地看出交接点。由图 3 可知, 当功率和超过单台主变额定功率 1.1 倍时, 则退出备自投(图 3 设定了  $k=1$ )。

第二步从系统考虑备自投投退的方法如下:

1) 针对每个故障场景, 如果备自投动作后没有设备越限, 则所有备自投都不会有越限风险; 如果出现设备越限, 则越限风险根据潮流转移量按照比例分摊到引起越限的备自投上, 其中越限风险的计算公式与第一步类似。

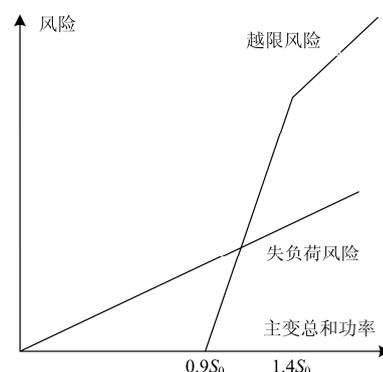


图 3 主变功率与风险的关系

Fig. 3 Relationship between power and risk of transformer

2) 累加所有故障场景各个备自投的越限风险量, 按照从大到小排队, 设定越限门槛值, 退出超过门槛值的备自投。

门槛值需要根据经验与地调的风险偏好来设置。例如, 有的用户倾向于尽量避免变电站全站失电, 如果备自投动作后设备越限, 后续可以采取切除部分次要负荷。这种情况就可以把门槛值设定的高一些。

除此以外, 还有实用性的地方需要考虑: 1) 有的站内备自投具备过载联切的功能, 这种备自投将不参与投退策略, 而是根据电网风险实时计算最优切负荷量, 供相关人员监视, 具体细节不再赘述。2) 有的站内备自投自身具备过流闭锁功能, 通过现场初步测试情况来看, 本文的投退策略相比备自投自身的闭锁功能, 更容易使备自投退出。如果投退指令与站内备自投自身闭锁指令不一致时, 则优先采纳投退指令。

### 2.3 数据可靠性校核

备自投系统对于基础数据可靠性的要求体现在以下方面。

1) 要求开关状态准确, 体现在备自投分析依赖于拓扑信息。如果开关状态有误, 将导致: 校核时错误判定设备失电后无备用; 监控时对于故障后备自投拒动判断失误; 网络备自投无法启动等。

2) 要求设备功率遥测准确, 因为风险监视和投退控制依赖于遥测的准确, 遥测错误可能会导致电网风险的增加。

可疑遥信的判别传统上是基于状态估计的预处理程序, 近年来发展了基于可信度评估的可疑遥信辨识<sup>[14]</sup>。对于可疑遥信的处理方式如下: 如果可疑遥信位置在备自投(包括网络备自投)所在的供电和备用路径上, 则需要闭锁与该备自投相关的所有功能(包括监视、控制和校核)。如果可疑遥信位置在

电网其他位置, 则给出告警。

可疑遥测的判别传统上是基于状态估计不良数据辨识, 但有如下问题: 不良数据可能有残差污染; 参数错误容易造成周边量测较大残差。因此, 近年来发展了抗差状态估计和参数辨识等技术, 但仍然不能完全避免可疑遥测的误辨识。因此, 可疑遥测的判别不能采用单一判据, 必须满足下列条件中的两个及以上:

1) 状态估计判断为不良数据。

2) 相关设备不平衡, 例如母线功率不满足基尔霍夫第一定律; 线路两侧有功差异很大; 支路有功、无功、电流和电压的关系严重偏离等式约束。

3) 遥测长期不刷新, 或者遥测相对于前几次采样明显跳变。

对于可疑遥测对备自投系统的影响, 有如下处理措施: 可疑遥测出现在网络备自投相关的设备中, 需要网络备自投暂时放电; 可疑遥测出现在站内备自投相关设备时, 停止对其进行投退控制。

## 2.4 网络备自投控制校核

由于网络备自投直接对开关进行控制, 因此控制校核非常重要。本文在文献[4]的基础上, 增加使用全网信息特别是拓扑信息参与校核, 可以显著增强网络备自投的运行控制可靠性。主要体现在以下几点。

1) 设备带电或失电状态的网络拓扑校核

故障情况下, 设备失电, 不仅要观察设备的遥测量, 还需要通过拓扑分析的结果, 确定该设备确实处于拓扑失电状态, 这样提高了失电判断的可靠性。同样, 判断备用设备是否有电, 还可利用拓扑分析的结果。例如, 某情况下由充电线路作为备用设备, 而该线路无电压量测, 此时无法通过电流值判断该线路是否带电, 可根据拓扑信息判断该线路是否有电。

2) 拓扑异常的发现

拓扑异常指的是设备遥测与拓扑信息出现了矛盾。例如电压互感器(PT)断线, 导致母线遥测无压, 但此时母线仍然拓扑带电, 这样便很容易识别出来PT断线。这里值得一提的是, 站内备自投识别PT断线是根据相关电流值来判断, 是存在风险的, 例如小电源供电且局部区域基本平衡时, 电流值很小, 此时的PT断线可能无法正确辨识。或者母线拓扑无压, 但遥测量正常, 这在故障情况下可能是遥测上送延迟; 如果系统未启动(无故障情况), 则可能是设备连接异常, 或者刀闸位置错误。

3) 控制流程的配合与校验

网络备自投进入动作状态时, 控制过程可能是

复杂的。例如, 要与站内备自投配合, 或者在自动恢复控制过程中, 调度员(监控员)已经抢先进行了恢复操作。此外, 复杂的电网结构采取的是逐步恢复的过程, 只有当某个母线恢复后, 才可以进行下一个母线的恢复控制。由于遥测上送延迟的存在, 恢复控制的配合应该基于遥信(拓扑)来进行, 否则恢复速度延迟太多。

具体如下: 进行某步恢复之前(一般包括先拉开关再合开关), 先判断预想母线是否拓扑失电, 否则停止该步骤, 进入下一步骤的恢复控制。某步恢复完成, 需要先判断预想母线是否拓扑恢复带电, 否则超过预定时间可判别控制失败(可能是开关拒动, 也可能是遥控通道中断), 停止所有控制过程, 闭锁网络备自投。

同时, 网络备自投所有的控制过程都要进行拓扑校验, 除了传统的防误闭锁外, 还包括下列校验逻辑: 所有拉开开关的操作都不得增加新的负荷拓扑失电; 所有闭合开关的操作都不得导致小电源非同期合闸(小电源存在拓扑路径连通到该开关); 联切小电源开关时, 还必须保证小电源处于孤岛范围内。

在网络备自投中应用网络拓扑信息, 还有以下地方需要处理:

网络拓扑判别活电气岛的规则是同时存在发电机(也包括等值发电机)和负荷。但对于网络备自投, 如果某电气岛只存在小电源和负荷, 则判断为死岛, 因为这样的孤岛一般不能维持电压和频率。

## 3 讨论

备自投系统的未来发展存在若干不确定问题, 作者在此提出, 供同行参考讨论。

### 3.1 站内备自投的后备控制

备自投系统中的监视分析功能可以监测到故障后站内备自投是否拒动。从技术角度, 实现站内备自投拒动后补充控制, 是没有任何困难的。如果这样做, 就实现了站内备自投的系统级后备, 对提高电网的供电可靠性具有重要意义。但这样违反了分散控制的原则, 同时因为站内备自投的数量非常庞大, 维护备自投模型时可能存在错误, 如果允许直接控制开关, 其误控开关的代价可能难以接受。因此笔者建议将备自投拒动后补充动作以辅助决策的形式提供给调度监控人员。

### 3.2 站内备自投的标准化

对于备自投装置的标准化, 广东电网已经做了很多卓有成效的工作<sup>[15]</sup>, 但主要是在备自投装置的功能配置、压板设计、现场接线等方面的标准化, 侧重于装置层面。国网也在制定相关标准并征求各

方意见。本文从备自投系统的层面出发, 提出两点可尝试的备自投标准化措施:

1) 实现备自投模型对于 EMS 和备自投装置的统一化, 例如都可以用 XML 等格式表达。备自投模型可以在子站维护, 并从子站上传至 EMS, 并实现自动建模和自动关联。

2) EMS 系统根据电网实时运行情况, 可以远程修改站内备自投的定值。

实现站内备自投的标准化, 需要调度管理机构、备自投装置厂家、EMS 厂家通力合作, 制定新的行业标准, 这不是短时间内可以完成的。

## 4 应用实例

本文成果在南通电网进行了初步部署和测试, 本文以南通的一个区域局部电网为例, 介绍说明本文所提出备自投系统的优势。

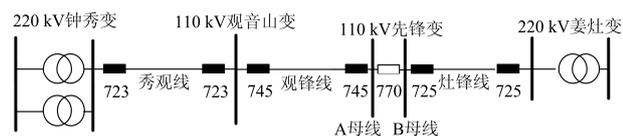


图 4 局部区域电网

Fig. 4 An area power grid

如图 4 所示, 110 kV 先锋变的两条 110 kV 母线分列运行, 分别由 220 kV 钟秀变和 220 kV 姜灶变供电。770 开关为母联, 装设站内备自投。

测试时假定灶锋线发生永久性故障, 先锋变站内备自投会分开 725 开关, 合上 770 开关。站内备自投自身可以检测母线所带负荷, 越限时自身闭锁, 从而保证观锋线不过载。但实际测试时发现某方式下该算例观锋线不过载, 但是却引起了秀观线过载, 而这种情况仅靠站内备自投是无法避免的。这说明: 基于全网信息的集中校核是有必要的, 可以有效减少备自投动作后的越限风险。

钟秀变到观音山变是典型的串行供电结构, 因此装设了网络备自投系统。在发生秀观线故障后, 网络备自投可以恢复观音山变的供电。但如果完全依赖网络备自投的集中控制, 考虑到信息传输处理的延时, 需要 20 s 以上才可以开始实际恢复过程。而先锋变的站内备自投如果发挥作用, 仅在 5 s 内先锋变 A 母线就已经先行恢复供电了, 可以减少用户损失。这说明, 备自投系统的分散控制是必要的。

## 5 结论

本文提出基于集中校核与分散控制的备自投系统, 系统包括监视分析、在线控制、离线校核 3

个方面的功能。该系统可以综合全网信息, 改变站内备自投孤立运行的现状, 提高电网的供电可靠性。备自投系统已经在江苏南通等电网开展实施, 并具有进一步推广的潜力。

进一步的研究方向包括: 与地区电网辅助决策软件配合, 为电网风险评估、事故后恢复辅助控制等程序提供信息, 提高辅助决策的实用水平。

## 参考文献

- [1] 杨浚文, 吴文传, 孙宏斌, 等. 一种基于 EMS 的广域备自投控制系统[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(11): 61-66.  
YANG Junwen, WU Wenchuan, SUN Hongbin, et al. A wide-area automatic switchover system based on EMS[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(11): 61-66.
- [2] 徐希, 韩韬, 杜红卫, 等. 主站集中式广域备用电源自动投入系统[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(21): 112-115.  
XU Xi, HAN Tao, DU Hongwei, et al. A main station based centralized wide area automatic switchover system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(21): 112-115.
- [3] 周伊琳, 孙建伟, 陈炯聪. 区域网络备自投及其测试关键技术[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(23): 109-113.  
ZHOU Yilin, SUN Jianwei, CHEN Jiongcong. Spare power automatic switchover for area network and its key test technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(23): 109-113.
- [4] 邹德虎, 王仲达, 徐柳飞, 等. 网络备自投系统在地调 EMS 中的应用[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(17): 106-111.  
ZOU Dehu, WANG Zhongda, XU Liufei, et al. Application of a power network automatic switchover system in the EMS of regional dispatch center[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(17): 106-111.
- [5] 潘凯岩, 黄红远, 车磊. 区域备自投通用模型建模及实现逻辑[J]. 南方电网技术, 2011, 5(3): 51-55.  
PAN Kaiyan, HUANG Hongyuan, CHE Lei. General model building and implementation logic for regional BATS[J]. Southern Power System Technology, 2011, 5(3): 51-55.
- [6] 施雄华, 郭云川, 金震, 等. 适用于串行供电网络的区域备用电源自动投入系统[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(23): 88-92.  
SHI Xionghua, GUO Yunchuan, JIN Zhen, et al. A regional automatic switchover system for serial power supply network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013,

- 37(23): 88-92.
- [7] 杨启洪, 赵伟杰, 陈善文, 等. 备自投装置动作引起过负荷的解决方案[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 145-149.  
YANG Qihong, ZHAO Weijie, CHEN Shanwen, et al. Solution to overload caused by automatic bus transfer device action[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 145-149.
- [8] 刘若溪, 张建华, 苏玲, 等. 地区电网备自投在线投退控制策略(一)备自投投退组合在线动态选择新方法[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(3): 1-5.  
LIU Ruoxi, ZHANG Jianhua, SU Ling, et al. Online control strategy of busbar automatic transfer switch for regional power grids (1): online dynamic selection of switching combination[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(3): 1-5.
- [9] 刘若溪, 张建华, 李更戡. 地区电网备自投在线投退控制策略(二)考虑备用电源侧可用供电能力的备自投控制策略[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(4): 13-16.  
LIU Ruoxi, ZHANG Jianhua, LI Gengyu. Online control strategy of busbar automatic transfer switch for regional power grids (2): control strategy considering available supply capability of standby power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(4): 13-16.
- [10] 文屹, 董凯达, 刘孝旭, 等. 多层次一体化备自投系统的研究及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 104-110.  
WEN Yi, DONG Kaida, LIU Xiaoxu, et al. Study and application of multi-level unified auto-transfer-switch system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 104-110.
- [11] 于同伟, 蔡玉朋, 金世鑫. 一种面向智能变电站的广域备自投系统[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 129-135.  
YU Tongwei, CAI Yupeng, JIN Shixin. An application for smart substation-oriented wide-area backup automatic switch[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 129-135.
- [12] 龚成明, 於益军, 路轶, 等. 加权最小二乘状态估计量测权值计算的实用方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(11): 143-147.  
GONG Chengming, YU Yijun, LU Yi, et al. Practical method for calculating measurement weights in weighted least square state estimation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(11): 143-147.
- [13] 潘凯岩, 谭大帅, 赵勇, 等. 地区电网计及备自投的N-1静态安全分析快速计算方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(24): 122-128.  
PAN Kaiyan, TAN Dashuai, ZHAO Yong, et al. A fast computing method of N-1 in static safety analysis considering BATS in regional power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(24): 122-128.
- [14] 张婷, 翟明玉, 张海滨, 等. 基于不确定性推理的变电站拓扑错误辨识[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(6): 49-54.  
ZHANG Ting, ZHAI Mingyu, ZHANG Haibin, et al. Substation topology error identification based on uncertainty reasoning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(6): 49-54.
- [15] 杨文佳, 张荫群, 吴国炳, 等. 广东电网备用电源自动投入装置标准化设计的研究[J]. 南方电网技术, 2009, 3(增刊): 103-107.  
YANG Wenjia, ZHANG Yinqun, WU Guobing, et al. Research on the design standardization of automatic bus transfer device of Guangdong power grid[J]. Southern Power System Technology, 2009, 3(S): 103-107.

收稿日期: 2016-10-12; 修回日期: 2016-12-06

作者简介:

邹德虎(1986—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电力系统状态估计、备自投系统、高性能计算在电力系统中的应用; E-mail: zoupaper@163.com

徐希(1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电网调度自动化、电力系统分析与控制;

闪鑫(1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电网调度自动化、电力系统分析与控制。

(编辑 周金梅)