

DOI: 10.7500/AEPS20140416003

智能电网运行充裕性的研究框架

(三)解耦与协调

蔡 斌^{1,2}, 薛禹胜^{2,1}, 薛 峰², 谢东亮², 文福拴³, 董朝阳⁴, 许 昭⁵

(1. 南京理工大学自动化学院, 江苏省南京市 210094; 2. 南瑞集团公司(国网电力科学研究院), 江苏省南京市 211106;

3. 浙江大学电气工程学院, 浙江省杭州市 310027;

4. School of Electrical and Information Engineering, The University of Sydney, NSW 2006, 澳大利亚;

5. 香港理工大学电机工程学系, 香港)

摘要: 将充裕控制问题按事件序列、相继事件、非预防性控制决策、预防性调度决策逐步解耦。基于防御代价及剩余风险之和最小的原则, 从下到上逐层扩大优化范围, 搜索代价性能比值最低的措施组合来满足运行充裕性, 并迭代求取准优解。对各事件序列, 按其概率与功率缺额之卷积值从大到小的顺序处理; 同一个事件序列内的不同事件则按发生的顺序处理。若某级备用不够(或太多), 则在较低级别(或较高级别)中按代价性能比从小到大(或从大到小)选择升级(或降级)对象, 并指定其调度执行时刻。若充裕性事件发生时的瞬时备用不足, 就需要实施紧急控制或校正控制来避免不受控的大停电。

关键词: 充裕控制; 供需协调; 备用级别; 备用优化; 动态优化; 风险管理; 多道防线

0 引言

运行充裕性约束往往被粗放地处理为配置占负荷总量一定比例的备用容量(reserve capacity, RC)。但随着强随机的间歇性可再生能源(RES)和电动汽车入网规模的不断增加, 充裕性决策对电力可靠性、经济性和减排的影响越来越大, 充裕性的风险管理理念也就越来越重要^[1]。

文献[2-4]根据负荷预报, 对有功功率分层优化, 解耦协调, 实现多尺度的动态调度。文献[5-7]进一步考虑了系统安全和备用约束。传统的有功调度方式是人工日前计划与自动发电控制(AGC)的结合。由于这 2 个时间尺度的跨度太大, 无法满足大规模风电接入后的控制精度要求。文献[8]提出“多级协调、逐级细化”的经济调度模式, 在日前计划与 AGC 之间增加了滚动计划和实时调度环节, 根据在线信息修正较大尺度的发电计划与实际工况的偏差, 但未在多时间尺度下考虑机组组合及调整备用计划。

进一步的研究包括对发电机组、可中断负荷(interruptible load, IL)及储能装置等不同 RC, 实施

预防、紧急及校正等控制, 以应对间歇性 RES、负荷不确定性及机组停运等充裕性事件。而为了实现控制决策方法从确定性到风险性, 从单时间尺度到多尺度, 从发电环节到发、输、用环节, 从离线到在线, 从孤立到协调的转变, 就必须将视野从电力系统内部扩展到物理、经济及环境等领域, 并重新审视充裕性分析与控制的框架、模型、量化分析及控制优化。

本系列文章的首篇提炼了发电运行充裕性的要素及形式化描述, 拓展其研究范畴及思路, 建立了综合考虑多时间尺度、多响应级别(简称级别)及供需协调的 RC 控制框架, 提出了充裕性三道防线^[9]。第 2 篇剖析了智能电网的发电-用电充裕性评估及控制任务, 从需求、对象和时机等侧面梳理问题的复杂性, 提出基于风险观点的动态优化及解耦协调思路^[10]。这些文献将 RC 控制措施按能源流程分为发电侧 RC(RCGS)与需求侧 RC(RCDS); 按控制时滞分为旋转 RC、热 RC、冷 RC 等; 按控制时机分为事件发生前的充裕性预防控制(preventive control for adequacy, PCfA)、事件发生后的充裕性紧急控制(emergency control for adequacy, ECfA), 以及违约后的校正控制(correction control for adequacy, CCfA), 与稳定性校正控制(CCfS)统称为校正控制(CC); 按不确定性的强弱划分事件序列。

本文则进一步阐述充裕控制的解耦优化与迭代协调的具体思路, 讨论发、输、用电的不同环节的协调、不同 RC 级别之间的调度、PCfA 与 ECfA 之间

收稿日期: 2014-04-16。

国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2011AA05A105); 中英合作研究项目(513111025-2013, EP/L001063/1); 国家电网公司科技项目。

的优化协调,以及不同事件序列之间的协调等问题。

用各事件序列的概率与功率缺额之卷积值反映应给予的关注度,并按其值从大到小的顺序处理各事件序列,按时间顺序动态分析一个事件序列中的事件组分。优化各级 RC 的调度方案,使防御代价及剩余风险之和最小。针对卷积值最大的事件序列,先考虑仅采用预防性调度的优化方案,再考虑替换为非预防性控制(包括 ECfA 和 CC)来改进目标函数值的可能性。即采用 ECfA 和/或 CC 来替代 PCfA,获取针对该事件序列的局部最优解。

以该局部最优解为参照,依次校核各剩余事件序列的充裕度。若后者充裕,则不改变;若不充裕,则以目标函数值最小为原则增加预防和/或非预防性控制量。由于更新后的方案改变了局部方案的初

始条件,故需要通过迭代,求取针对整个充裕性事件序列来说全局(准)最优的调度方案。

根据收敛的结果,向合约市场发出是否需要购买 RC 服务的要求及各调度指令的最迟实施时刻。

1 充裕性的多道防线

文献[11-13]将针对稳定性事件的停电防御体系划分为规划建设、预防控制、继电保护、紧急控制、CC 和恢复控制等阶段,分别优化对应的防线。由于各道防线的控制时机和控制空间的缩小,大大减少了求解困难。每道防线都在其他防线的决策基础上优化,而其结果又修正了其他防线的决策背景。对充裕性事件的防御采用同样的思路(见图 1),并融入已有的停电防御框架。图 1 中: ρ 为充裕度。

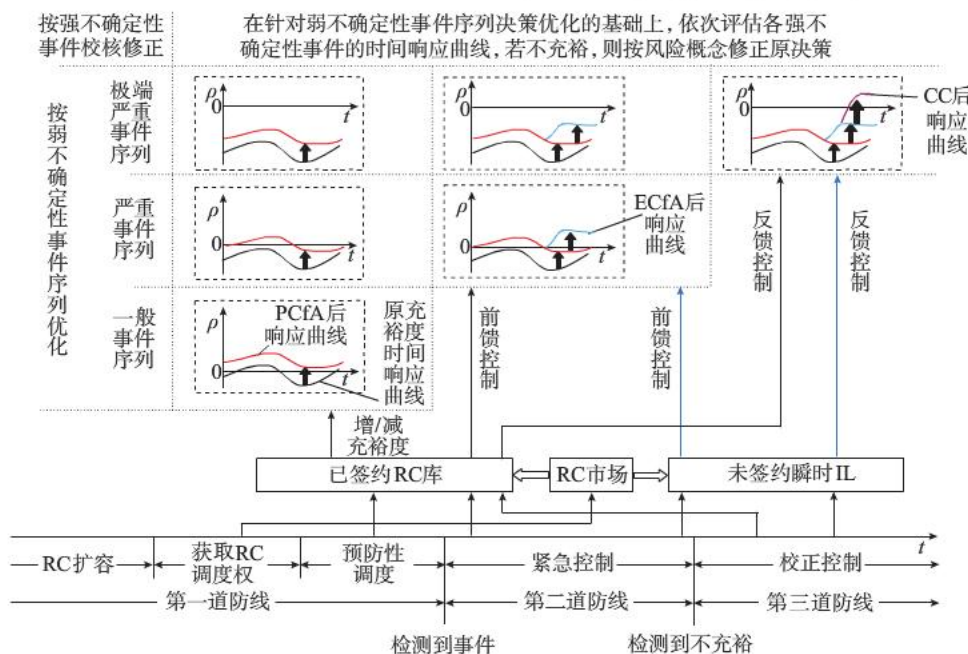


图 1 充裕性的多道防线及 RC 市场

Fig.1 Multiple-defense-lines of adequacy and market of reserve capacity

该框架基于物理、市场及环境等在线信息,定量评估充裕性风险及对运行状态的敏感度,并在仿真环境中完成态势预报及风险预警。进一步周期性优化调度方案,尽量降低运行费与备用风险之和,向合约市场发布 RC 服务的需求,帮助调度员适时调配各级 RC 库的存量。而在充裕性事件实际发生时,执行前馈的 ECfA 和/或反馈的 CC。

2 充裕性控制的解耦优化与迭代协调

大系统优化往往先松弛其子系统间的耦合,将决策分解为几个子决策,再通过协调来改善目标函数逼近全局最优解^[14]。文献[15]在协调稳定性的预防控制与紧急控制时,将预想事故集按失稳模式划分为不同子集,从而将原问题降阶为各子集的优

化任务,而后者又被解耦为预防控制的优化和紧急控制的优化,进而通过协调得到全局最优解。

建议的充裕控制优化的解耦-迭代框架分为四层,自上而下依次为:①将事件划分为强、弱不确定性两类,先求取针对弱不确定性事件序列的控制方案,再用强不确定性事件对其进行校核与修正;②对弱不确定事件序列中的各序列按关注度排序;③先针对关注度最高的序列求取局部最优决策,然后按其他的事件序列校核修正;④针对所给定的事件序列,评估系统的充裕度,优化 PCfA 及 ECfA。

3 针对事件序列的 RC 动态优化

3.1 按代价性能比对 RC 排序

大规模间歇性 RES 发电出力的预报误差使瞬

时 RC 的实际投入服务的频次大大升高,RC 的调度与成本的不确定性增加。固定按照某一成本项或几个成本项加权和进行 RC 排序不再适用,需给出涵盖固定成本(如容量费)与可变成本(启停费、电量费等)的动态代价性能比指标。

3.2 按响应级别从高到低逐级优化 RC

按照 RC 当时的状态离可实际发电的准备时间,分为旋转(秒级)、热(分级)、冷(小时级)等级别。充裕性事件序列有其发生概率,而所造成的功率缺额也是时变的,长期维持大量旋转 RCGS 并不经济。应该“适时”地在“适市”中提前签订“适种、适量”的 RC 合约,并在执行决策时“适时”地在“适级”的 RC 库之间,升降“适种、适量”的 RC^[9]。

当前时间断面上的 RC 库状态,是过去一段时间内的决策累积结果,也是后续优化搜索的起始条件。由于工况及充裕性事件的不确定性,该起始点往往偏离在过去断面所设想的最优解。

当已签约的旋转 RC 与事件功率缺额之差,即旋转备用的充裕度在未来一段时间内处于合理范围内时,不进行调度。太低时,则按代价性能比从低到高的顺序,向热 RC 库提出升级要求。若热 RC 不足,需向冷 RC 库提出升级要求。若所有已签约的 RC 均不足以满足充裕度,则需在合约市场购买新的各级 RC 的调度权,而在必要时可考虑用代价性能比好的未签约 RC 实现 ECfA 或 CC。当充裕度过高时,执行其逆过程,通过降级或中止合约来降低备用成本,并注意用低级别 RC 库中那些代价性能比更好者来替代高级别库中的 RC 资源。

3.3 动态优化

RC 的优化调度不仅要计及固定与可变的成本,还要考虑与调度时序有关的不同级别 RC 库之间升降级费用的动态过程,以使整个运行规划时段内的 RC 运行费用及风险之和最小。这显然比机组组合问题还要复杂。

动态优化的内容包括:针对预想需求上升而导致的旋转 RC 不足,将适量的低级别(大时滞)RC 提前升级,其提前升级时间不小于该低级别 RC 的升级时滞;针对预想的需求下降而导致旋转备用量冗余,可考虑高级别 RC 的降级;针对预想的需求降低后不久又上升的情况,需具体权衡其代价及风险。

在协调同一 RC 级别中物理特性与经济特性均不相同的 RCGS 及 RCDS 时,也可以采用先解耦再协调的迭代方法。但更高效的方法是按统一的代价性能比值混合优化。

对于多 RC 级别的协调,需通过完整的动态仿真计算其全局代价,并通过迭代得到总代价及总风险之和最小的调度时序方案。

4 针对多个事件序列的 RC 调度

4.1 协调模型

充裕度控制针对的是瞬时 RC 的实时控制,但后者有赖于对较低各级别 RC 的提前调度,以保证充足的瞬时(或旋转)RC,并力求降低总的备用代价。PCfA 属于第一道防线,非预防性控制则包括第二道防线的 ECfA 及与安全稳定控制共用的第三道防线 CC。

PCfA 必须同时考虑事件序列表中的每个事件序列,其代价包括 RCGS 及 RCDS 中与事件是否发生无关的升级费及容量费;ECfA 则分别针对不同的事件序列,以 RCDS 费用为主,只有在事件发生时才付出控制代价。PCfA 与 ECfA 在一定程度上可以互相替代,其协调问题是混合型的非线性规划。

假设通过 PCfA,将系统的充裕度由给定点 x_0 移到靶点 x_T 。 x_T 对于某些事件可能仍然不充裕,故一旦发生事件 i 时,立即执行专门针对该事件的 ECfA,以保证系统的供需平衡。因此,协调的目标是使从 x_0 到靶点 x_T 的 PCfA 代价和 x_T 对应的各 ECfA 代价的概率加权之和为最小。其数学模型如下:

$$\begin{aligned} \min C(x_T) &= \min(C_p(x_T) + C_e(x_T, e)) = \\ &= \min\left(C_p(x_T) + \sum_{i=1}^{n_e} p_i C_{ei}(x_T, e)\right) \quad (1) \\ \text{s.t.} \quad &\begin{cases} g(x_T) = 0 \\ h(x_T, e) \geq 0 \end{cases} \quad (2) \end{aligned}$$

式中: C (或 C_p)为优化所考虑的时间范围内的总控制代价(或 PCfA 代价); C_e (或 C_{ei})为 PCfA 基础上的 ECfA 代价; p_i 为 ECfA 措施的实施概率(等于 PCfA 无法覆盖的事件序列 i 的发生概率); n_e 为需要考虑的事件序列总数; $g(x_T) = 0$ 为优化的等式约束,如功率平衡; $h(x_T, e) \geq 0$ 包含各类控制对象的物理和经济约束,如冷机组的启停时滞。

4.2 PCfA 与 ECfA 的内部优化

4.2.1 PCfA 的内部优化

PCfA 是针对研究时段内潜在的各种充裕性事件序列的预测型控制,在充裕性事件发生前实施,以保证在未来一段时间内的不同时刻都有适量的瞬时 RC。虽然预决策可提前,但决策任务仍然繁重,包括不同级别、调度容量及实施时刻。其中,必须考虑被控对象升降级的时滞及各级别之间的动态耦合。

对于给定的事件序列,PCfA 按代价性能比选取足量 RC 作为初值。逐步用未选措施集合中代价性能比最低的 RC 替代已选措施集合中代价性能比最高的 RC,直到总控制风险不再明显减少为止。考虑到不确定性因素,PCfA 应该以控制代价与剩

余风险之和最小为目标。

4.2.2 ECfA 的内部优化

当系统瞬时 RC 不足以应对已发生的充裕性事件时,由事件驱动的 ECfA 应尽早地发挥作用。通过切除负荷、非瞬时 RC 的紧急升级等措施来维持或恢复系统的供需平衡,减小停电风险。显然,升级至瞬时 RC 所需时滞越短的那些 RC 越宝贵,包括无需提前通知的 IL 及具有瞬时发电能力的储能设备等。对持续时间长的充裕性事件,需要考虑升级时滞大的 RC 来替代更稀缺的资源。ECfA 的内部寻优过程与 PCfA 类似。

ECfA 属于前馈控制,控制精度差;即使未受资源限制,仍可能发生欠控情况。此时,就需依靠由轨迹驱动的 CC。

4.3 PCfA 与 ECfA 的协调

PCfA 与 ECfA 的协调流程见图 2。对所有事件序列按概率与功率缺额之卷积值排序。针对排序最前的事件序列 E_i ,求取仅采用 PCfA 时的最优控制决策序列;在此基础上,考虑以 ECfA 替代部分 PCfA 并降低防御代价及剩余风险之和的可能性,获取针对该事件序列的局部最优解。

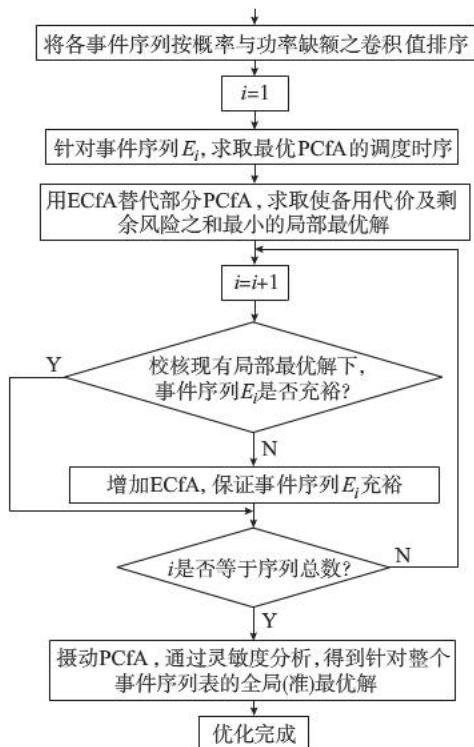


图 2 PCfA 与 ECfA 的协调流程

Fig.2 Coordination process between PCfA and ECfA

在该局部最优解基础上,按卷积值顺序校核其他事件序列的充裕度。若充裕,则不作改变;否则,就优化相应事件序列的 ECfA。

以此决策为起始,摄动 PCfA,根据目标函数值的变化,迭代求取对于全部事件序列来说全局(准)

最优的调度方案和合约计划,以及与各个事件序列相对应的 ECfA 控制方案。

5 对不确定性极强的充裕性事件的考虑

充裕控制所面临的不确定因素来自发、输、用电等环节,包括时间维度上的强不确定性和弱不确定性。前者如机组故障,其发生时刻无法预报,故要在全时段内维持同量的 RC。后者如风电及负荷变化,其发生时段有一定的预报精度。

两类事件序列可以合并为一个事件序列,并按风险关注度指标排序。在大规模 RES 入网后,弱不确定事件成为充裕性风险的主要来源,可先按其配置 RC,再校核强不确定性事件的风险,并通过灵敏度分析优化修改 RC 配置。

6 结语

充裕控制决策包括不同级别 RC 库之间的预防性调度与非预防性控制,RCGS 与 RCDS 两个合约市场的协调,不同类型 IL 的合约的协调等。如此复杂的问题,即使理论上也难以设计出严格的优化框架。“解耦优化、迭代协调”方法虽然在理论上可以得到近似的最优解,但在实践中,还必须引入一些假设。显然,本系列文章只是抛砖引玉,详细研究的结果将另文报道。

参考文献

- [1] 赖业宁,薛禹胜,王海风.电力市场稳定性及其风险管理[J].电力系统自动化,2003,27(12):18-24.
LAI Yening, XUE Yusheng, WANG Haifeng. Electricity market stability and its risk management[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(12): 18-24.
- [2] ZABORSZKY J, SINGH J. A reevaluation of the normal operating state control of power system using computer control and system theory: Part I load estimation[C]// Proceedings of IEEE Power Industry Computer Applications Conference, May 15-19, 1979, Cleveland, OH, USA: 205-213.
- [3] MUKAI H, SINGH J, SPARE J, et al. A reevaluation of the normal operating state control of power system using computer control and system theory: Part II dispatch targeting[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1981, 100(1): 309-317.
- [4] KAMBALE P, MUKAI H, SPARE J, et al. A reevaluation of the normal operating state control of power system using computer control and system theory: Part III tracking the dispatch targets with unit control[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1983, 102(6): 1903-1912.
- [5] INNORTA M, MARANNINO P. Advance dispatch procedures for the centralized control of real power[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1986, 1(2): 233-239.
- [6] INNORTA M, MARANNINO P, GRANELLI G P, et al. Security constrained dynamic dispatch of real power for thermal groups[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1988, 3(2): 774-781.

- [7] MARANNINO P, GRANELLI G P, MONTAGNA M, et al. Different time-scale approaches to the real power dispatch of thermal units[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1990, 5(1): 169-176.
- [8] 张伯明,吴文传,郑太一,等.消纳大规模风电的多时间尺度协调的有功调度系统设计[J].电力系统自动化,2011,35(1):1-6.
ZHANG Bomeng, WU Wenchuan, ZHENG Taiyi, et al. Design of a multi-time scale coordinated active power dispatching system for accommodating large scale wind power penetration [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(1): 1-6.
- [9] 薛禹胜,谢东亮,薛峰,等.智能电网运行充裕性的研究框架:(一)要素与模型[J].电力系统自动化,2014,38(10):1-9.
XUE Yusheng, XIE Dongliang, XUE Feng, et al. A research framework for operation adequacy in smart grid: Part I elements and models [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(10): 1-9.
- [10] 蔡斌,薛禹胜,薛峰,等.智能电网运行充裕性的研究框架:(二)问题与思路[J].电力系统自动化,2014,38(11):1-6.
CAI Bin, XUE Yusheng, XUE Feng, et al. A research framework for operation adequacy in smart grid: Part II problems and ideas[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(11): 1-6.
- [11] 薛禹胜.时空协调的大停电防御框架:(一)从孤立防御到综合防御[J].电力系统自动化,2006,30(1):8-16.
XUE Yusheng. Space-time cooperative framework for defending blackouts: Part I from isolated defense lines to coordinated defending [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(1): 8-16.
- [12] 薛禹胜.时空协调的大停电防御框架:(二)广域信息、在线量化分析和自适应优化控制[J].电力系统自动化,2006,30(2):1-10.
XUE Yusheng. Space-time cooperative framework for defending blackouts: Part II reliable information, quantitative analyses and adaptive controls[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(2): 1-10.
- [13] 薛禹胜.时空协调的大停电防御框架:(三)各道防线内部的优化和不同防线之间的协调[J].电力系统自动化,2006,30(3):1-11.
XUE Yusheng. Space-time cooperative framework for defending blackouts: Part III optimization and coordination of defense-lines [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(3): 1-11.
- [14] 兆文忠,杨德庆,李福,等.结构系统优化分解法的解耦研究[J].大连铁道学院学报,1995,16(1):18-23.
ZHAO Wenzhong, YANG Deqing, LI Fu, et al. Decoupling research in structural optimal design based on decomposition [J]. Journal of Dalian Railway Institute, 1995, 16(1): 18-23.
- [15] XUE Yusheng, LI Wei, HILL D J. Optimization of transient stability control: Part II for cases with different unstable modes[J]. International Journal of Control, Automation, and Systems, 2005, 3(2): 341-345.

蔡斌(1985—),男,博士研究生,主要研究方向:电力系统充裕分析与控制、大能源可持续发展。E-mail: caibin@sgepri.sgcc.com.cn

薛禹胜(1941—),男,通信作者,中国工程院院士,博士生导师,主要研究方向:电力系统自动化。E-mail: xueyusheng@sgepri.sgcc.com.cn

薛峰(1971—),男,博士,高级工程师,主要研究方向:电力系统安全稳定分析与控制。E-mail: xue-feng@sgepri.sgcc.com.cn

(编辑 孔丽蓓)

A Research Framework for Operation Adequacy in Smart Grid Part III Decoupling and Coordination

CAI Bin^{1,2}, XUE Yusheng^{2,1}, XUE Feng², XIE Dongliang², WEN Fushuan³, DONG Zhaoyang⁴, XU Zhao⁵

(1. Department of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China;

3. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

4. School of Electrical and Information Engineering, The University of Sydney, NSW 2006, Australia;

5. Department of Electrical Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China)

Abstract: An operation adequacy control task is decoupled stepwise in terms of event sequences, cascading events, non-preventive control, and preventive dispatch. Based on the minimum cost-performance-ratio principle, the searches are performed from the bottom up to provide suitable operation adequacy of the minimum defense costs and remaining risks. Iterations may be needed to obtain a global quasi-optimum result. The convolution value of power shortage with respect to the probability is used for ranking the different sequences; the optimization is conducted for each sequence in the descending order of the convolution value. Inside a sequence, the individual events are dealt with in the chronological order. If there is a lack of (or an excess of) reserve capacity within a certain grade, the objects for reserve capacity dispatch are selected for upgrading (or downgrading) from the lower (or the higher) grade, and the optimal executing time is also decided. In case of insufficient instantaneous reserve capacity, emergency control and/or corrective control will be compulsorily executed to avoid uncontrollable blackouts.

This work is supported by National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (No. 2011AA05A105), NSFC-EPSRC Collaborative Project (No. 513111025-2013, No. EP/L001063/1) and State Grid Corporation of China.

Key words: adequacy control; coordination between supply and demand sides; reserve grades; reserve optimization; dynamic optimization; risk management; multiple-defense-lines