

DOI: 10.7500/AEPS20140416002

智能电网运行充裕性的研究框架

(二)问题与思路

蔡 斌^{1,2}, 薛禹胜^{2,1}, 薛 峰², 谢东亮², 宋晓芳², 王 亮³, 曹 路³

(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. 国家电网华东电力调控分中心, 上海市 200120)

摘要: 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、扰动、控制对象和控制时滞等方面梳理问题的复杂性;讨论充裕控制的决策过程,包括对信息的要求、待调控出力的预报、充裕性事件的设定、充裕度量化指标的定义、系统功率平衡与备用功率的动态行为、充裕度的在线评估、备用资源的调度与控制。提出基于风险观点的动态优化及解耦协调的求解思路,将整个问题解耦为不同子问题后分别优化,再通过协调获得全局准优化的效果。

关键词: 充裕控制; 可再生能源; 需求侧管理; 停电防御; 备用资源; 风险管理; 多道防线

0 引言

现有的充裕性研究以机组组合^[1]和经济调度^[2]算法为基础。在离线环境下,通过确定性方法^[3]或概率性方法^[4]确定所需的备用容量(reserve capacity, RC),并据此安排运行中的 RC。可再生能源(renewable energy source, RES)大规模入网后,充裕性事件的发生概率及不平衡功率量均显著增加,而需求侧对市场的深度参与及对电能质量的要求提高等因素也对上述方式提出重大挑战。

采用静态的确定性方法安排 RC,会带来高昂的机会成本或停电风险。概率性方法用事件发生的概率分布反映不确定因素,但在概率门槛值的选择上难以权衡控制代价与停电损失,并由于无视所有的小概率事件,而可能承受高风险^[5-6]。为了克服这些缺点,需要在考虑概率的同时,考虑 RC 控制的代价及充裕性事件的后果。此外,还应以在线滚动的方式,定性及定量地分析充裕性,适时调度各种 RC 资源。优化的内容不仅是瞬时(或旋转)RC,还包括热 RC 及冷 RC 等,以及 RC 资源在不同响应状态之间的转移,特别是那些状态变换时需要较大的经济代价或滞后时间者。文献[7]给出了电力市场环境,电力充裕性的分析与控制框架,拓展了充裕性问题的视野。该框架利用需求侧 RC(RCDS)与发电侧 RC(RCGS)在物理上的不同特性及在经济上的

互补特点,减少所需的 RC 代价;同时利用它们在不同市场中的竞争来降低市场力及充裕性风险。

这样一个涉及不同学科且包括多样化的控制对象、控制时机、约束条件的复杂框架,对问题分析及决策优化带来了巨大的挑战。为了降低求解的复杂性,本文在剖析发电与用电之间的相对充裕性的机理、理清问题内部的各种关联的基础上,提出了“解耦优化-迭代协调”的思路。

1 电力充裕性的动态描述

为了清晰地描述大规模 RES 入网后的充裕性问题,下文将 RES 发电作为负的用电功率,并将该虚拟负荷(负值)与实际负荷之和称为待调控出力(needed controllable power, NCP)。NCP 需要由一次能源稳定的电源承担,并需要用可控性较好的 RC 来保障电力系统在容量事件下的充裕性。显然, NCP 的不确定性包含了 RES 及负荷两个方面,其中 RES 的不确定性更强。

图 1 描述了电力充裕性调度的动态过程。其中纵轴表示功率。正向的纵半轴表示可控的瞬时发电出力(P_G),以及包括冷 RC(C)、热 RC(H)及旋转 RC(S)等不同响应级别(以下简称级别)的 RCGS。为便于处理不确定因素,将 RES 与负荷两者的预报曲线合并,得到 NCP 的期望值及波动区间。反向纵半轴则表示 RCDS 已签约的可中断负荷(interruptible load, IL)、可立即切除的 IL 以及执行决策所指定的负荷切除(LS)。横轴表示时间,并以决策时刻为原点。左半平面反映的是 NCP 及各级 RC 库动态的历史记录。右半平面则是对未来 NCP

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。

的预报及对各 RC 库的调度决策。NCP 预报的分辨率和准确度会随时间尺度的增加而下降。冷备用级的 RC 需要经过相应的滞后时间才能升为热备用级,再经过相应的滞后时间升为旋转及瞬时备用级。这些滞后时间取决于具体控制对象的物理特性。因此,调度优化过程从瞬时 RC 库开始,若发现其存量不足,则向热 RC 库提出升级要求,若其量过多则降级处理。图中,C-H 表示发电机组从冷备用升至热备用的动态过程,依此类推。 P_G 若小于 NCP,就意味着被迫停电。对各级 RC 库的优化调度,就是为了以最小的备用代价及风险之和,使电力系统在相关的充裕性事件下的 PG 不小于 NCP。

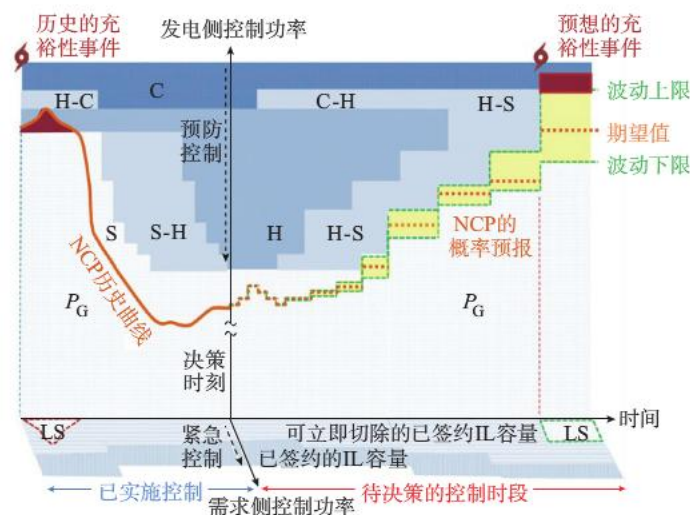


图1 运行充裕性调度中 RC 的状态演化

Fig.1 State evolution of RCs in reserve dispatching

与传统方式相比,智能电网的新型充裕控制具有以下特点。

1)充裕性事件:除传统考虑机组停运及支路开断外,还须考虑 RES 出力大幅度变化,甚至出现 NCP 为负值(发电功率过剩)的情况。此外,虽然 NCP 预报的平均误差可能由于 RES 出力与负荷两者预报误差的方向不同而部分抵消,但 NCP 预报的最大误差必定大幅度增加,进而加大充裕控制的机会成本。这些因素大大增加了发电与备用计划的难度。

2)控制对象:将 RC 资源按其状态离开可瞬时发电状态的“距离”,分为旋转、热、冷等不同级别。各级别中均可能包含 RCGS 与 RCDS 两类不同的资源,共同参与系统的供需平衡控制。

3)控制时机:分为充裕性事件发生前的预防性充裕控制(preventive control for adequacy, PCfA),事件发生第一时间的紧急充裕控制(emergency control for adequacy, ECfA),以及与安全稳定控制共用的校正控制(correction control, CC)。PCfA 包

括 RCGS 的机组启停与状态转移,以及 RCDS 的 IL 合约签订等。ECfA 则包括:①RCDS 中的主动 LS;②RCGS 中的蓄能等机组向旋转备用状态的快速转移;③低级别 RCGS 的紧急升级及紧急告知需要提前告知的 IL(ILA);④上述措施的时间差配合。

4)ECfA 需要 PCfA 的提前调度:包括机组及时从低响应状态升入适当的高响应状态,以及 IL 的适时签约。过早完成上述准备会增加不必要的控制代价,而过迟准备则会造成不可控的停电。

5)动态优化:基于在线工况、负荷预报、RES 预报、充裕性事件预警及各级 RC 库的现状,周期性地优化调度各级 RC 库,协调 RCGS 及 RCDS,协调合约市场及执行决策。

2 对停电防御框架的扩展

2.1 充裕性的预警与控制

充裕性与安全性是可靠性的两个侧面,它们不但共享许多信息与控制对象,在决策中有很强的相互影响,甚至存在冲突而需要协调。充裕性调度的结果必须满足安全校核,而安全性的预防控制与恢复控制也应该满足充裕性约束。因此,不应该单独构建充裕控制决策系统,而应将其融入已有的安全控制决策系统^[8-10],成为一体化的停电防御框架。

防御框架分为信息采集、分析预报、决策支持 3 层,如图 2 所示。

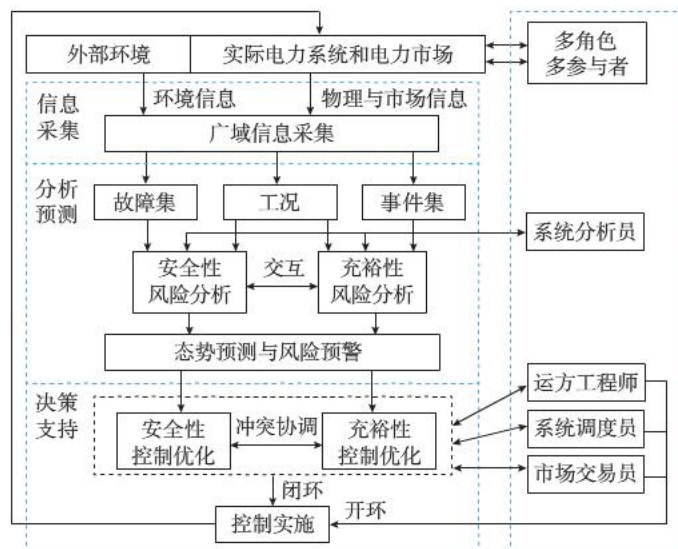


图2 充裕控制的决策框架

Fig.2 Framework of an adequacy control decision-making system

信息采集层获得物理、市场及环境等相关信息。分析层针对系统当前状态,定量地在线评估其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。决策支持层则周期性地优化调度方案,尽量降低运行费用与备用风险之和,并根据所

得到的最优解,帮助运营部门向合约市场发布 RC 服务的需求,帮助调度员适时调配各级 RC 库的存量。此外,决策支持层还负责在充裕性事件实际发生时,启动必要的紧急/校正控制。

2.2 信息的采集

除了不同时间尺度的系统信息,如发电计划、NCP 预报曲线(由负荷预报曲线及不可控 RC 入网功率预报曲线构成)、各 RC 库的存量及其组成特性以外,还需要获取市场信息、环境信息、不确定程度等信息。

1)物理信息。需采集的物理信息涉及电力系统、控制对象及物理扰动。描述 RC 的数据结构应兼容 RCGS 与 RCDS;描述充裕性事件的数据结构应兼容安全性事件。

2)经济信息。需采集的经济信息包括 RC 报价与清算结果、经济发展与扰动等。参照 RCGS 的服务成本构成,不妨将 RCDS 的服务成本也分为可部分缺省的启停费、容量费和电量费 3 个部分,从而统一描述所有 RC 的经济特性。上述费用曲线还可能需要考虑非线性,如 IL 的电量费可能与停电持续时间呈递增型非线性关系。

3)环境信息。需采集的环境信息包括天气、地理灾难及排放市场信息等。

4)博弈信息。RCGS 和 RCDS 市场中的大量博弈行为必然影响到调度员实际可利用的 RC 服务的技术特性与经济代价。RCDS 市场可以直接与大用户商讨 IL 合同,或通过售电商聚合散户中的 IL 资源。为此,必须充分掌握市场信息,以便在有效监管市场力及提高市场效率之间协调优化。利用实验经济学仿真,使少量实验参与者与大量计算机代理共同模拟市场的不同角色,并与数学模型动态交互。将获取的动态响应曲线作为合约市场的输出,提供给相应的 RC 库。这样,决策支持环节就可按其在线优化调度决策。

2.3 充裕性事件表的设定

将不平衡功率随时间变化的一段折线定义为一个充裕性事件元,并用三元组:(起始时刻,带正负号的变化量,所占时长)描述。其中每个元都可以附带不确定性特征描述,如期望值及方差,或其他类型的概率分布函数及参数。将若干个这样的事件元组成一个充裕性事件;若干个这样的事件组成一个充裕性事件序列。不同的充裕性事件序列对 RC 调度提出的要求必然进一步加剧求解的困难程度。

适当地设置其中的参数就可反映各种随机特性。然而受限于维数灾,实际应用时往往大量简化,如采取不同置信度水平的波动上下限。

2.4 充裕性知识的提取

某时刻的充裕度大小可以用该时刻最大可控的瞬时 RC 与充裕性事件所引起的容量缺额之间的差值作为指标。对于指定的一个充裕性事件序列,需要用该指标在整个相关时段内的演化过程来反映。施加控制后,系统充裕度水平的变化体现为该指标的时间响应曲线的变化。

2.5 决策的优化

充裕性决策旨在根据对充裕性事件的预警与仿真寻优,通过适时、适量地对不同级别 RC 库的存量实施动态升降调度,来掌控充裕性事件的风险。同时还需兼顾系统对安全性和电能质量的要求。

各种 RC 库的动态调度优化应考虑到:RCGS 与 RCDS 的各种 RC 资源;RC 资源的响应时滞对提前升级调度的不同要求;不同充裕性事件序列之间的协调;主要的不确定性因素。此外,还应该适当提前在对应的市场中购买 RC 资源的调度控制权。

决策优化的结果包括以下两个方面,并以足够小的周期动态更新。

1)当时应实施的 RC 决策,包括需要在合约市场上新签的 RC 服务及应实施的调度操作。瞬时级别的 RC 服务由自动调频系统闭环自动执行,而事前的调度则应保持合理的瞬时 RC 库存量。而对较低级别的 RC 库的存量调度则采用开环操作。

2)紧急控制决策用的预决策表,以备在充裕性事件实际发生后按事件匹配。

3 RC 资源的状态调度与功率控制

3.1 容量事件发生前的调度准备

只有那些已经处于瞬时状态的 RC 资源才能实时地平衡功率。许多 RC 资源特别是大多数 RCGS,必须依次经过若干操作,才能将其备用状态从自然状态提升为瞬时状态。备用状态级别越高,对备用需求的响应就越快,但运行费用也越高。因此,需要根据对未来容量事件的预判,适时、适量地调度 RC 资源。

事件前的预防控制为可能发生的功率缺额提前准备好机会成本及风险之和最小的各级 RC,包括获取适量控制权的 IL 合约、RC 库的预防调度(如提前升降级及告知 ILA),以及储能系统的调度。而利用实时电价来影响需求曲线也属于预防控制措施之一,但一般只能应对有较强规律性的充裕性事件。事件后的紧急控制由事件驱动,而校正控制由参数轨迹驱动。其控制措施包括:旋转 RCGS 的二次调频、切除 IL、投入储能系统,以及非旋转 RC 的紧急升级。事件前的调度需要综合考虑预想的整个充裕

事件集,其中不同事件可能有不同的需求;事件后的控制则仅针对已发生事件所造成的后果。

3.2 各 RC 库的调度决策

虽然功率缺额的实时平衡只能依靠瞬时状态级的 RC 来完成,但只要在充裕性事件实际发生前能将平时处于较低级别的 RC 及时升级为瞬时级别,就能获得同样的控制效果。但随着 RC 级别的提高,其 RC 服务成本也会增加。过早地将低级别 RC 升级,或不必要地维持高级别 RCGS,或购买过量的 IL 控制权都不可取。

只有当较低级别的 RC 库的存量足够时,才能及时响应升级的调度指令,将所需数量的 RC 升到较高级别。各 RC 库调度操作存在强耦合,在各自优化的基础上必须加以协调。预报提前的时间越长,其误差也将增大,故低级别的 RC 库的调度面临更强的不确定因素。

当充裕性事件发生前,若较低级别的 RC 未能足量地升为瞬时级别,致使瞬时级的 RC 不足以补偿功率缺额,就会造成低频问题甚至停电事故。此时为了避免不受控的停电,就只能先有选择地紧急切除 IL。如果没有足够的 IL 合约,那么有选择地主动切除适量的非 IL 合约的负荷也比听任不受控的停电好。与此同时,必须将较低级别的 RC 紧急升级至瞬时级别,或向 ILA 发出停电准备通知,以便尽早恢复供电。

3.3 控制对象的差异

3.3.1 物理特性的差异

RCGS 与 RCDS 的物理特性不同,包括控制机理、状态转换、响应速度、持续时间、各种约束等,故必须具体分析。

RCGS 通过备用发电容量投入发电来提高充裕性;RCDS 则是通过切除负荷来提高充裕性。前者是积极性措施;后者则是消极性措施,只能作为短期应急措施,一般不允许长时间停电,必须尽快将低级别 RCGS 升级而恢复供电。

两者的时间响应也有很大差异。RCDS 在收到执行命令后,可以瞬间通过负荷的切除来减少不平衡功率。如果合约中包含意外赔偿条款,则 ILA 合同规定的提前通知时间约束在紧急情况下有可能无法遵循。储能系统则可能因耗尽或饱和而立即停止工作。而 RCGS 从收到调度指令开始,到备用状态升级完成所需要的转换时间一般都较长,对供电的连续性来说不能忽略。不同种类的发电设备有不同的时滞特性,而同一个 RCGS 调度对象在不同的状态转换过程中的滞后时间也不同。时滞越短,则时间响应特性越好,但机会成本往往较高。

3.3.2 经济特性的差异

RC 控制权在事前签约时就要支付容量费,而不论在合约期间是否实际调用;在从冷 RC 升为热 RC 时就需要支付启动费;在 RC 发电后则需要支付电量费。除电量费为连续量外,其他均为离散量。对高赔偿 IL 要支付容量费、电量费,低电价 IL 的服务成本只有容量费,而 ILA 的辅助服务成本包含启停费(停复工准备的代价,已反映容量因素)和电量费(与停电时长有关)。

对 RCGS 和 RCDS 的成本采用统一模型描述有利于简化决策、减少迭代层次。控制成本均由固定和可变两部分组成,RCDS 的可变成本与备用服务时间的关系为线性或非线性,而 RCGS 则为线性。电力市场环境下,RC 服务的报价不仅与成本相关,而且与提供者的报价策略、市场力及监管有关。控制代价不但与功率缺额的大小及概率有关,还与事件发生前的调度有关。

3.3.3 社会特性及市场特性的差异

国务院第 599 号令规定主动切负荷等同于故障损失负荷,均被记为电网减供负荷^[1]。但若能通过市场合约取得控制权的 IL 则不应归入统计。此外,主动切负荷可以大大减少故障损失负荷。

虽然需求侧辅助服务与发电侧辅助服务有相似之处,但却是分开竞争的市场,其竞争参与者、风险意识及竞争策略都不尽相同,市场机制也不能照搬。但两者必须统一清算,才能最大限度地抑制双方的市场力,充分发挥市场效率。

RCGS 和瞬时响应的 IL 的控制执行权在调度部门;而 ILA、分时电价(TOU)和实时电价(RTP)等需求侧响应则通过用户的自我意愿来影响 NCP,存在非常大的时滞及不确定性。

3.3.4 控制对象互补特性的利用进一步增加了复杂性

RC 资源的上述差异有利于优化空间的扩大及市场力的抑制,如 LS 与冷 RC 紧急启动相结合可以替代热 RC,LS 与热 RC 相结合可以替代旋转 RC,但这也大大增加了求解的难度。文献[7]指出了利用 RCGS 固有物理时滞约束和 RCDS 提前通知时间的约束实现发、需侧调度级别的统一。

3.4 不确定性概念的重要性更加突出

针对特定的事件集,充裕性与稳定性都有各自的可行域及相应的裕度概念。若运行点处于稳定域内就不需要稳定控制措施,而运行点处于充裕域内时仍需 RC 服务。此外,由于充裕性事件的概率远大于稳定性事件,故不确定性的概念对于充裕性问题更为突出。

RES发电预报的平均误差一般都比负荷预报的平均误差大得多,而前者的最大瞬时误差则更是难以控制。最大瞬时误差对于充裕控制来说又恰恰是关键的影响因素。对预报曲线中的趋势分量,按风险最小原则动态优化调度;而对秒级的快速小幅波动,则必须通过RCGS等瞬时RC应对。

虽然充裕性与稳定性事件都难以精确预估其发生时刻及严重程度,但与稳定性对策不同,充裕性对策往往需事先将控制对象的状态提升到可瞬时反应的级别。过早或过量地将RC升级都会增加备用代价,但过迟或欠量的升级却会造成更大的被动停电损失。因此,风险概念对于充裕性问题更为突出。

3.5 广义充裕性

一次能源、排放、自然灾害、电力市场、资金约束、通信等领域的事件也会通过影响电力系统内部环节而引发充裕性问题^[12],故与广义阻塞概念的引入类似,有必要将充裕性的概念扩展到广义范畴。文献[13]讨论了RES与电煤等一次能源对电力系统充裕度的影响,并建议将停电防御框架拓展至一次能源领域。

4 求解的思路

4.1 用风险成本代替可靠性约束

风险的概念既要考虑到不确定事件的概率,又要考虑到若该事件发生所造成的损失,并取为这两者的乘积。为了克服在事件发生前难以评估损失的困难,文献[5]将其替换为最优的主动控制方案所需的费用。这样求取的风险值反映了为避免事件后的损失而主动付出的控制成本的期望值,可视为可靠性成本。它与折旧成本及运行成本一样,都以货币为量纲,故可直接加入目标函数,而不再在约束条件中出现。为了系统在小概率、高风险的充裕性事件下不彻底崩溃,可以在必要时主动切除适量的未签约RC服务的负荷。为此付出的赔率必然大大高于高赔偿IL的赔率,但既然像稳定性事件那样是小概率事件,在全局上则是必须考虑的最后防线。这样,优化的目标函数就包含了折旧成本、运行成本、合约内的可靠性成本及违约的可靠性成本。

可靠性约束被货币化后,目标函数的最小化过程就反映了决策方案的经济性与充裕性之间的协调优化。比较不同控制方案的目标函数值,就可以识别出经济性与充裕性综合的较优解。利用灵敏度分析技术,就可逐步搜索到协调的(准)最优解。

4.2 动态规划问题的解耦与聚合

充裕问题在不同时间尺度之间、不同控制时机之间、不同RC库之间,以及不同控制对象之间都存

在耦合。为了保障系统在预报的充裕性事件序列集合下的可靠性,不但需要通过物理手段适时、适量地调整不同级别RC库的存量,还必须通过市场手段适当提前地取得适量的控制权,而IL的中断次数、单次时长、总时长等合约约束也进一步增加了前后决策之间的关联。因此,不能孤立地处理各个充裕性事件,而必须将其形式化为动态规划问题。

求解如此复杂的问题,必须合理地策划其解耦-聚合方式。解耦粒度太大,不利于子问题的求解;解耦粒度太小,则会增加聚合的难度。为此需要按电力充裕度的内在机理,减少解耦层次。

在求解某一子问题时,应该充分考虑其他相关子问题的状态,尽量避免陷入本子问题虽然可行、但全局不可行的解,以提高收敛效率。

4.3 对不确定因素的考虑

原始工况中的不确定性于在线分析环境中可不考虑。充裕性事件是需要考虑的主要不确定因素。在成功解决确定性场景下的充裕性问题的基础上,先考虑单个充裕性事件的不确定性,再考虑单个充裕性事件序列的不确定性,最后考虑多个充裕性事件序列的不确定性。

确定性的充裕性事件序列由发电计划与NCP之间的差值曲线来描述,反映了负荷及RES发电的预报信息,其优化解是处理不确定性事件的起始点。

对于合约决策阶段,通过实验经济学仿真来计及合约市场中的博弈、控制对象等不确定性。在执行决策阶段,可采用的控制措施空间可视为确定。在合约市场与执行决策各自优化的基础上,两者之间的交互可视为确定。

5 结语

市场经济的深入发展、RES的大规模入网、大量集中及分布式电能存储单元的参与,以及需求侧与电网的深层交互等因素,把电力充裕性这个原本被粗放处理的问题推到了前沿。

本文设计的充裕性决策框架基于物理、经济、环境、博弈等多方面信息的支持。较为完整地描述了电力系统的工况、各种RC的特性及充裕性事件序列;基于风险概念,在目标函数空间中协调电力充裕性与经济性;在可行性空间中协调控制权与执行权;在控制空间中的协调任务则涉及不同时间尺度之间、RCGS与RCDS之间、PCfA与ECfA之间。

决策的优化及协调都有赖于对充裕性的量化分析与风险评估,并进一步按实际工况在线更新。决策的实施则需要将决策支持的开环执行与事件驱动的闭环执行相结合。充裕控制的决策优化大大增加

了分析与控制的难度。关键技术包括如何将此复杂问题解耦及协调求解,如何以控制代价与剩余风险之和最小为目标函数。下一篇将讨论基于解耦-协调框架的求解方法。

参考文献

- [1] 陈皓勇,王锡凡.机组组合问题的优化方法综述[J].电力系统自动化,1999,23(4):51-56.
CHEN Haoyong, WANG Xifan. A survey of optimization-based methods for unit commitment[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(4): 51-56.
- [2] HAN X S, GOOI H B, KIRSCHEN D S. Dynamic economic dispatch: feasible and optimal solutions[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2001, 16(1): 22-28.
- [3] 中华人民共和国水利部.SD 131-84 电力系统技术导则[S].北京:水利电力出版社,1984.
- [4] GOOI H B, MENDES D P, BELL K R W, et al. Optimal scheduling of spinning reserve[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(4): 1485-1492.
- [5] 薛禹胜,刘强,DONG Zhaoyang,等.关于暂态稳定不确定性分析的评述[J].电力系统自动化,2007,31(14):1-7.
XUE Yusheng, LIU Qiang, DONG Zhaoyang, et al. A review of non-deterministic analysis for power system transient stability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(14): 1-7.
- [6] 薛禹胜,肖世杰.综合防御高风险的小概率事件:对日本相继天灾引发大停电及核泄漏事件的思考[J].电力系统自动化,2011,35(8):1-11.
XUE Yusheng, XIAO Shijie. Comprehensively defending high risk events with low probability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(8): 1-11.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 中华人民共和国国务院.第599号令:电力安全事故应急处置和调查处理条例[S].2011.
- [12] XUE Yusheng, XIAO Shijie. Generalized congestion of power systems: insights from the massive blackouts in India[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2013, 1(2): 91-100.
- [13] XUE Yusheng, CAI Bin, JAMES G, et al. Primary energy congestion of power systems[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2014, 2(1): 39-49.

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 章黎)

A Research Framework for Operation Adequacy in Smart Grid: Part II Problems and Ideas

CAI Bin^{1,2}, XUE Yusheng^{2,1}, XUE Feng², XIE Dongliang², SONG Xiaofang², WANG Liang³, CAO Lu³

(1. School 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. State Grid East China Power Dispatch and Control Center, Shanghai 200120, China)

Abstract: This paper analyzes the assessment and control tasks of smart grid operation adequacy. The complexity of the problem is dissected in terms of demand, disturbance, controlled objects and time-lag. The decision-making process of adequacy control is also discussed including information acquisition, estimation of the needed dispatch power, parametrization of adequacy events, definitions of adequacy index, dynamics of power balancing and reserving, on-line adequacy assessment, dispatch and control of reserve resources. A risk-based conceptual model for dynamic optimization is presented, and a decoupling and coordination solution method is also proposed to give a global quasi-optimum result.

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; renewable energy; demand side management; blackout prevention; reserve resources; risk management; multiple-defense-lines