

可中断负荷参与系统备用研究综述

孔祥清¹, 雷 霞¹, 刘庆伟¹, 柏小丽²

(1. 西华大学电气信息学院, 四川 成都 610039; 2. 泸州电业局, 四川 泸州 646000)

摘 要:可中断负荷参与备用能量市场的运营,在增强系统安全可靠性的同时还可以降低备用成本,提高市场的经济稳定性。在目前能源紧缺,满足节能减排和保护环境为前提的工业发展中具有一定的意义。简要介绍了市场环境下备用容量体系及可中断负荷参与备用的成本效益;详细总结了可中断负荷参与系统备用的模型研究,并比较了各种模型的优缺点。最后对可中断负荷参与系统备用的研究趋势进行了展望。

关键词:可中断负荷;备用容量;电力市场;成本效益

Abstract: Interruptible loads (ILs) participating in system reserve, not only could enhance the security of power system but also could reduce the costs of system reserve and improve the economic stability of power market. It will promote the development of industries which must meet the requirements of energy saving and emission reduction in the age of shortage of energy. Reserve capacity system in market environment and the cost-effective of interruptible loads participating in system reserve are introduced. Then, the models of ILs participating in system reserve are summarized in detail. At the same time, the advantages and disadvantages of the same type of models are compared. Finally, the development trend of interruptible loads participating in system reserve is prospected.

Key words: interruptible load; reserve capacity; electricity market; cost-effective

中图分类号:TM715 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2012)01-0057-04

0 引 言

市场环境下,各市场参与者以收益最大化为目标,功率缺额事件具有高度的不确定性。在传统管制的电力系统中,出现系统有功不足时,系统调度员往往强制无补偿的中断某些用户的供电来保证电力系统的安全运行。但在电力市场环境中,对作为电力消费者同时也是市场参与者的用户,终止这样的服务不能再是单纯的拉闸限电,需要给予停电用户一定的补偿。可中断负荷(interruptible load, IL)即是指那些以合约等方式允许有条件停电的负荷^[1]。实施可中断负荷前需要电力公司与用户先签订可中断合同,在系统紧急情况下电力公司可以按照合同内容中断用户的电力供应,但给予这些用户一定的经济补偿^[2]。

由于市场环境下实际可用发电容量、负荷需求和容量事故不确定性的增加,备用容量的配置问题更加地突出。作为电力系统需求侧管理(DSM)的重要组

基金项目:国家自然科学基金项目(51007006);四川省科技厅科研基金(2009JY0139);四川省电力电子重点学联项目(SZD0503)

成部分,可中断负荷可以充分利用用户的用电灵活性。因此,当系统出现功率缺额时,既可以在发电侧购买机组备用容量,也可在需求侧购买IL,它们均可作为系统备用容量。并且IL响应速度快相当于发电侧的旋转备用,从IL参与系统备用的角度,可将IL视作一种需求侧紧急备用容量资源。对于小概率的严重容量事故,仅仅依靠发电侧备用不但不经济,技术上也不可行。为了防御互联系统发生灾难性大停电,紧急控制和校正控制都必须配置足够的切负荷措施,相应地,就必须建立完善的IL市场参与系统备用^[1]。可中断负荷可以看作一种虚拟的新型能量资源,只需要增加一些经济手段,改变电力系统中对用户原来固有的运营模式,就可以在不消耗任何实际能源的情况下,增加系统的发电容量和备用容量充裕性,减少备用机组的启停和运行费用;同时可以提高系统的可靠性,使用户以同样的电价享受更优质的供电服务;还可以增加用户侧的需求弹性和经济稳定性。只要IL能与其他备用形式合理协调,得到合理的补偿,那么IL不仅能提高系统的可靠性和安全性,还会促进资源的优化配置。

从IL参与系统备用的角度出发,概括了市场环

境下的备用容量体系,分析了IL参与备用的成本效益。然后详细论述比较了IL参与系统备用的建模思路,最后给出了以后的可能研究方向。

1 市场环境下备用容量体系的建立

市场环境下,电力系统不再是垄断的,各市场参与者均有权参与系统备用容量市场的竞争^[3]。电网公司作为系统备用容量的购买方,必须从可靠性与经济性协调的角度来合理选择备用容量市场的参与者,合理配置各类备用容量。为防御互联系统发生灾难性的大停电,以及避免因相继开断引起更大范围的不受控停电,系统备用容量的配置应是多方面的。一个好的系统备用容量体系需要多种备用容量及其交易市场的参与。对于频繁发生的基础备用需求,应以发电侧备用容量来应对,而对于小概率的严重容量事故,则可以采用可中断负荷容量的形式。文献[4]按发电机组响应时间及其与系统是否同步,将发电侧备用容量分为瞬时备用、快速备用、慢速备用及冷态备用。按对用户的补偿方式,IL可分为低电价可中断负荷(ILL)与高赔偿可中断负荷(ILH),其中ILL是在事故前通过电价打折来进行补偿^[5-7],ILH是在事故发生且中断实施后才对其进行事后的高额赔偿^[8]。文献[9]从风险的角度建立了发电侧备用与ILL、ILH共同参与的备用容量市场,其结构框图如图1所示。

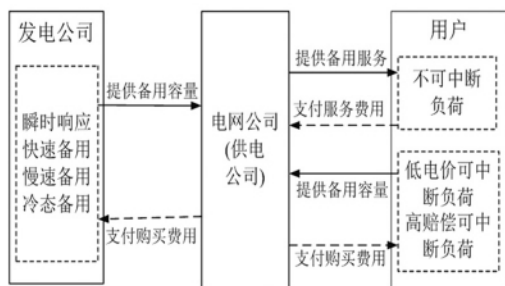


图1 电力市场下系统备用容量体系

2 可中断负荷参与系统备用的成本效益分析

2.1 IL成本估计及补偿方法

可中断负荷参与备用的成本(简称IL成本)即负荷停电损失,通常指直接损失,目前普遍以用户因停电而实际减少的利润来评估^[10]。影响IL成本的因素有:提前通知时间、停电持续时间、停电发生时

间、停电次数、停电频率、缺电比率、用电收益、缺电量等。文献[11]综合考虑了用户类型、提前通知时间、停电持续时间和缺电量等因素,建立了综合缺电成本模型,但是各因素的影响程度难以确定。文献[12-13]分别基于用户用电需求曲线为线性和指数形式建立起IL成本模型,可看出模型与用户需求价格弹性以及市场平衡点有关,即使缺电量相同,消费者剩余损失也可能不同,因而该模型能够动态评估IL成本的大小。文献[14]利用机制设计理论考虑供电公司的风险偏好,提出激励性可中断负荷合同模型,引导用户自愿参与可中断负荷管理,自愿披露真实缺电成本信息。文献[15-17]将期权的方法引入IL合同的中断价格制定中,分别以用户或电网单位电量期望收益最大为目标,推导出可中断合同的最优履约价。

2.2 IL参与系统备用的效益分析

可中断负荷参与系统备用,将供电可靠性也作为商品,不但有利于能源的合理利用和备用容量的优化配置,也增加了应对功率缺额的手段,有利于遏制发电商在备用紧张情况下滥用市场力^[18-19]。IL参与系统备用的效益主要体现在提高系统可靠性及供电充裕性,增强电力市场的经济稳定性等方面。

可靠性的提高相当于系统向用户提供了更优质的电能,使用户以不高于原来的电价享受更好的服务。文献[20]对此做了定量分析,指出可中断负荷的可靠性效益等于无中断负荷时切除的负荷容量与缺电成本的乘积,并进行了实例分析。文献[21]提出一种将直接负荷控制与可中断负荷管理相结合的自适应方案,该方案可以获取瞬时运行备用容量,同时对于电力系统动态扰动具有一定的鲁棒性。文献[22]依据微观经济学中的效用无差异理论,建立了市场环境下最优备用容量优化问题的数学模型。

从市场参与者方面考虑,可中断负荷参与系统备用可以调动需求侧参与市场的积极性,增强市场的经济稳定性,对各参与者都有益。

1) 对独立调度员ISO(independent system operator)、电能交易中心PX(power exchange):IL的参与可以削弱价格尖峰、平稳电价,还可以抑制市场中的投机行为。

2) 对电网公司:IL参与系统备用,极大地降低了系统边际电价^[19],使电网公司有可能通过降低RCGS的购买量及价格,来降低购电成本,进而提高其经济稳定性。

3) 对发电商: 与某些大用户签订可中断合同等效于新增装机容量, 增加了在市场报价中的灵活性。另外, IL 参与到备用中, 还可以延缓甚至减少新增机组的容量投资成本。

4) 对用户侧: 参与备用市场提供备用容量的 IL 用户, 不被中断时可以通过享受低电价来获得额外利润, 被中断时又可以获得中断赔偿。不参与中断的用户也可以由备用容量价格的降低, 供电可靠性的提高中受益。

3 可中断负荷参与系统备用建模

可中断负荷参与系统备用建模的最基本条件就是要满足系统备用需求平衡, 然后才是分别从不同的角度来列目标函数, 考虑不同的约束条件最后建立起 IL 参与系统备用的模型。

3.1 从电网公司的角度考虑 IL 参与备用的优化

以电网公司购买备用辅助服务的总成本最小为目标函数, 在满足系统可靠性等备用约束条件下建立数学模型, 通过各种算法(如基于蒙特卡罗随机模拟的遗传算法、非线性互补法、帕累托优化理论等等)求解得到 IL 与发电机组的最优组合情况。文献[23]以电网公司购买 IL 的总费用和由其产生的网损增加之和最小为目标函数, 考虑了不同地理位置的可中断用户对网损的影响, 采用排队法求解。文献[24]从电网公司的角度, 基于层次分析法建立 IL 参与备用的模型, 综合考虑了可中断负荷的报价、容量大小、响应时间、中断持续时间等因素。文献[25]考虑备用容量和电价波动对电力公司的影响, 以购买备用成本最小为目标函数建立了基于风险的最优事故备用容量购买模型。文献[26]考虑分布式电源(DG)和可中断负荷的基础上建立了配电公司利润最大化和总购电费用最小的双目标优化模型, 验证了 DG 和 IL 在规避风险和降低节点电价波动方面的作用。此方向研究的比较多, 数学模型的改进空间很小, 只有在算法上优化改进。

3.2 从用户的角度考虑 IL 参与备用优化

有些学者将用户侧的停电损失和获得的停电赔偿效益等因素考虑到模型中, 建立双侧开放的备用市场联合优化模型, 得到最优备用容量组合。文献[27]把用户参与系统备用也引入竞争, 以用户效益最大化为目标函数, 提出了一种基于潮流的主备用容

量市场联合优化模型。文献[28]在考虑停电持续时间等可靠性指标的基础上, 构建了新的缺电成本函数, 建立了考虑用户可靠性的可中断负荷管理模型。文献[29]提出了停电损失费用(EENS)的概念, 即由备用不足(包括发电机组和 ILs 两侧)引起用户停电造成的损失, 以系统总备用成本及 EENS 之和最小为目标函数, 求取参与备用的发电机组和 IL 的最优分配组合情况。单独以用户侧效益最大为目标函数建模的比较少, 大部分文献都是将用户侧成本效益因素作为一种约束条件加以考虑的。

3.3 考虑社会效益最大化情况下的 IL 参与备用的优化

以社会效益最大为目标函数, 引入发电侧的成本效益因素, 综合考虑 IL 参与备用后, 电网公司、发电侧和用户侧的成本效益, 应用博弈论或其他算法求得此时的备用容量配置和各参与方的成本效益。此种方法需要政府或其他独立机构(如美国电力市场中的 ISO)来组织协调各参与方的竞价和利润分配。文献[29]应用双方叫价拍卖和纳什讨价还价理论设计了可中断负荷实施的利益分享机制, 以社会效益最大为目标函数, 兼顾发电侧和电力公司的利益。以社会效益最大化为目标函数可以综合考虑资源的优化配置, 减少单位能耗和对环境的影响, 比单纯的以利润或成本等经济性指标做目标函数更有意义。

3.4 IL 的电价设计及合同管理模型的优化

电价的设计是 IL 合同管理中的一项重要内容, 因为无论对参与 IL 的用户激励还是电网公司的成本收益都要通过电价的杠杆作用来调节。研究者已经分别从激励机制^[14]、期权定价^[30]、最优潮流^[31]和直接参与报价^[32]等方面对 IL 的定价进行了研究。IL 合同内容主要包括合同有效期、中断提前通知时间、负荷中断量、中断持续时间、中断补偿费用等。文献[33]从 IL 补偿来源、用户中断成本角度应用机制设计理论思想建立了基于用户意愿的 IL 合同模型。文献[14]考虑供电公司的风险偏好, 同样利用机制设计理论建立了一种用户类型离散的激励型 IL 合同模型。文章表明对于风险进取的供电公司, IL 合同将成为其进行市场竞争和风险管理的有力工具。

3.5 其他方面的优化

还有些学者从其他角度研究 IL 参与系统备用的问题, 如用风险的观点研究系统备用容量中低电价可中断负荷(ILL)、高赔偿可中断负荷(ILH)与发电侧

备用容量(RCGS)的优化协调问题^[34]。用IL替代发电机组做系统备用对发电公司检修决策的影响^[35]。IL参与系统调频^[36]和秒级可中断负荷参与系统备用^[37]等。当然,各研究方向间难免存在一些交叉的内容。

4 结 语

在概括介绍市场环境下备用容量体系和可中断负荷参与系统备用成本效益的基础上,详细总结了IL参与系统备用的建模思路和方法。目前文献基本都只从市场的角度用经济学的方法考虑IL参与备用的优化建模问题。但是IL与系统备用都是电力系统中很重要的部分,它是实时变化的动态系统,目前的模型还不能完全反应其特点。所以可中断负荷参与系统备用优化还有以下几个方面需要进一步的研究。

1) 在满足系统安全可靠性的前提下设计更加能综合反映各参与方意愿的模型,运用更精确合适的算法寻求更加优化的IL与发电机组的组合结果,能够更加准确地量化各参与方成本效益情况。

2) 考虑可中断负荷参与备用后,系统在潮流、线损、输电阻塞、电压等方面的改变。建立考虑系统反馈的可中断负荷参与系统备用的优化模型。

3) 结合地方实际情况设计简单实用可操作性强的模型和算法,将IL参与备用应用到目前中国实际的电力系统中,逐步推进中国电力需求侧市场的开放。

参考文献

- [1] 薛禹胜,罗运虎,李碧君,等. 关于可中断负荷参与系统备用的评述[J]. 电力系统自动化,2007,31(10): 1-6.
- [2] Huang Kun-Yuan, Chin Hong-Chan, Huang Yunn-Chang. A Model Reference Adaptive Control Strategy for Interruptible Load Management[J]. IEEE Trans on Power Systems,2004,19(1): 683-689.
- [3] MALK A S. Simulation of DSM Resources as Generating Units in Probabilistic Production Costing Framework[J]. IEEE Trans on Power Systems,1998,13(4): 460-465.
- [4] 赖业宁,薛禹胜,汪德星,等. 备用容量服务市场的风险决策[J]. 电力系统自动化,2006,30(6): 1-5.
- [5] Chen C S, Lue J T. Interruptible Load Control for Taiwan Power Company[J]. IEEE Trans on Power Systems,1990,5(2): 460-465.
- [6] 任震,邝新武,黄雯莹. 电力市场中可中断电价的设计[J]. 华南理工大学学报,2006,34(4): 70-74.
- [7] Bhattacharya K, Bollen H J. Real Time Optimal Interruptible Tariff Mechanism Incorporating Utility - customer Interactions [J]. IEEE Trans on Power Systems,2000,15(2): 700-706.
- [8] Wang Jian-xue, Wang Xi-fan, Ding Xiao-ying. The forward Contract Model of Interruptible Load in Power Market[C]. IEEE PES Transmission and Distribution Conference, Dalian, China,2005:1-5.
- [9] 罗运虎,王勤,邢丽冬,等. 系统备用容量优化问题综述[J]. 电网技术,2007,31(23): 41-46.
- [10] 曹世光,杨以涵,于尔铿. 缺电成本及其估算方法[J]. 电网技术,1996,20(11): 72-74.
- [11] 王蓓蓓,李扬,金午桥,等. 需求侧竞价对高峰电价的成本效益分析[J]. 中国电力,2006,39(1): 31-35.
- [12] 何永秀,黄文杰,谭忠富,等. 电力备用市场化运营需求研究[J]. 中国电机工程学报,2004,24(3): 46-50.
- [13] 何永秀,王怡,黄文杰,等. 电力需求价格弹性与系统最优备用的关系[J]. 电力需求侧管理,2003,5(5): 20-23.
- [14] 方勇,李渝曾. 电力市场中激励性可中断负荷合同模型的建模与实施研究[J]. 电网技术,2004,28(17): 41-46.
- [15] GEDRA T W. Optional Forward Contracts for Electric Power Markets [J]. IEEE Trans on Power Systems,1994,9(4): 1766-1773.
- [16] 张少华,李渝曾,王长军,等. 结合期权理论的双边可选择电力远期合同模型[J]. 电力系统自动化,2001,25(21): 28-32.
- [17] 张少华,李渝曾,王长军. 一种双边可选择电力远期合同的定价模型[J]. 控制与决策,2002,17(6): 891-893.
- [18] 王蓓蓓,李扬,万秋兰. 需求弹性对统一出清电价下发电容量滞留的影响[J]. 电网技术,2005,29(14): 10-14.
- [19] Rajaraman R, Sarlashkar J V. The Effect of Demand Elasticity on Security Prices for the Poolco and Multi-lateral Contract Models[J]. IEEE Trans on Power Systems,1997,12(3): 1177-1184.
- [20] Boisvert R N, Coppers P A, Neenan B. The Benefits of Customer Participation in Wholesale Electricity Markets [J]. The Electricity Journal,2002,15(4): 41-51.
- [21] Huang K Y, Huang Y C. Integrating Direct Load Control With Interruptible Load Management to Provide Instantaneous Reserves for Ancillary Services[J]. IEEE Trans on Power Systems,2004,19(3): 1626-1634.
- [22] 吴集光,刘俊勇,牛怀平,等. 电力市场环境下最优备用容量的确定[J]. 电力系统自动化,2005,29(15): 10-13.
- [23] 于娜,芙蓉薇. 电力市场高峰时段可中断负荷优化购买模型[J]. 电力系统及其自动化学报,2010,22(4): 89-93.

(下转第91页)

散热能力。

2.5 安装碳粉收集系统

有实验表明碳粉在油雾的影响下,绝缘电阻可以由100 MΩ迅速降低到零。因此油性碳粉污垢是造成集电环室内各绝缘件绝缘性能下降的主要原因之一,所以有必要安装碳粉收集系统,及时带走碳粉,使之与油雾隔离,提高集电环以及碳刷之间的绝缘。

2.6 安装红外线测温系统

在集电环室内安装红外线测温系统,将信号接入监控系统,运行人员可随时监测机组集电环及每个碳刷温度的变化情况,能及时准确地找出温度异常的碳刷,消除缺陷。

3 沙湾电站集电环技改项目及结果分析

3.1 技改项目

根据沙湾水电站碳刷温度过高的原因,在年度检修过程中对集电环及碳刷进行了技改:①扩大集电环室通风窗口尺寸,通风窗口高度由原来的22 cm增加到60 cm,宽度不变;②集电环宽度由原来的4 cm增加到6 cm;③集电环返厂重新校圆打磨,表面更光滑;④使用质量更好的碳刷。

3.2 技改效果

(上接第60页)

[24] 周永灿,李扬. 基于层次分析法的可中断负荷模型参与备用市场的研究[J]. 电力需求侧管理,2010,13(1): 17-20.

[25] 常向伟,张有兵,曹一家,等. 计及风险因素的事故备用容量购买决策模型研究[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(23): 82-86.

[26] 李海英,李渝曾,张少华. 具有分布式发电和可中断负荷选择的配电公司能量获取模型[J]. 中国电机工程学报,2008,28(10): 88-93.

[27] 潘雄,罗春雷,徐国禹. 双侧开放市场中能量与备用容量的联合优化[J]. 电力系统自动化,2005,29(5): 10-15.

[28] 刘国春,张少华,王晔. 考虑用户可靠性的可中断负荷管理[J]. 上海大学学报:自然科学版,2009,15(1): 81-86.

[29] J. Bai, H. B. Gooi, L. M. Xia, G. Strbac. A Probabilistic Reserve Market Incorporating Interruptible Load[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 21(3): 1079-1087.

[30] Gedra Thomas W, Varaiya Pravin P. Markets and Pricing for Interruptible Electric Power[J]. IEEE Trans on Power Sys-

技改后经过长期运行,集电环和碳刷的温度较技改前明显降低,见表1。

4 结 语

发电机励磁碳刷及集电环发热现象运行中时有发生,严重威胁发电机的安全运行。因此,对集电环和碳刷的监视、维护并及时处理其发生的故障和损伤,改善集电环运行环境,是保证发电机长期稳定运行的重要工作之一。所提出的改造方案中的集电环部分,在葛洲坝125 MW机组已有相似的改造应用,效果明显,具有一定的借鉴作用。

表1 技改前后温度对比 单位:℃

		1 F	2 F	3 F	4 F
技改前	集电环	98	105	110	100
	碳刷	100	108	112	105
技改后	集电环	68	72	75	70
	碳刷	70	75	78	73

参考文献

[1] 国家技术监督局. 电炭材料及产品专用名词术语[M]. 北京: 国家技术监督局出版, 1997.

[2] 张广溢, 郭前岗. 电机学[M]. 重庆: 重庆大学出版社出版, 2002. (收稿日期:2011-07-26)

[31] Majumdar S, Chattopadhyay D, Parikh Jyoti. Interruptible Load Management Using Optimal Power Flow Analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(2): 715-720.

[32] Tuan Anh Le, Bhattacharya Kankar. Competitive Framework for Procurement of Interruptible Load Services[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(2): 889-897.

[33] 陈建军, 杨娜. 基于用户意愿的可中断负荷合同模型研究[J]. 现代电力, 2007, 24(6): 85-89.

[34] 罗运虎, 薛禹胜, Zhangyang DONG, 等. 发电容量充裕性的混合优化[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(12): 30-35.

[35] 贾德香, 程浩忠, 严健勇, 等. 基于博弈论的发电公司检修决策[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(1): 27-32.

[36] 刘文许, 林礼清, 温步瀛. 可中断负荷参与系统频率调节的研究[J]. 福建电力与电工, 2008, 28(3): 17-20, 23.

[37] 都亮, 刘俊勇, 田立峰, 等. 电力市场环境下的秒级可中断负荷研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(16): 90-95.

(收稿日期:2011-11-30)