计及源荷双边性能指标的市场交易模型

索瑞鸿[1],陈　杏[1],宋依群[1],严　正[1],姚良忠[2]
(1. 上海交通大学 电气工程系 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室,上海 200240;
2. 中国电力科学研究院,北京 100192)

摘要:高比例可再生能源电网内,为促进优质可控电源与可控负荷的发展,提高系统供需平衡的调节能力,考虑电源和负荷响应性能进行电力市场交易模式设计。在电源侧引入机组的调节性能指标;在负荷侧设置负荷聚合商参与市场的场景,并考虑负荷响应偏差的随机性进而提出负荷响应性能指标,以区分不同响应特性带来的运行成本差异。为合理协调计及性能指标的源荷双边资源,设计了两阶段的差异化出清机制。以系统总运行成本最小化为目标,构建有负荷聚合商参与的日前市场出清模型。通过算例结果表明,计及源荷双边性能指标的交易模型,可以引导资源的优化配置,降低市场的风险和损失。

关键词:电力市场;负荷响应性能;高比例可再生能源;市场交易模型;响应性能
中图分类号:TM 73;F 123.9　　**文献标识码**:A　　DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.02.026

0　引言

随着可再生能源在电力系统中的占比逐渐增大,由于风、光等间歇性能源的不可调节性,电网中承担调节任务的传统火电机组的净负荷曲线峰谷差将进一步拉大且陡度增加[1],同时可再生能源还使得净负荷的波动性和不确定性更加明显,这对电力系统的灵活调节性能提出更高的要求[2];此外,常规机组的发电小时数随着可再生能源的接入逐步降低,在运机组的减少又削弱了电网调节能力[3-4]。这一背景下,逐步淘汰系统中调节性能较差的机组,精简保留少量优质调节资源,成为未来电力系统的发展趋势。优质调节资源能灵活跟踪负荷曲线波动,并准确响应调度指令,具有维持系统稳定可靠的价值。然而其成本往往相对较高,单纯以报价出清的市场机制不利于引导资源优化配置。如何设计一定的市场交易模型以充分发挥灵活优质资源的长处,并释放符合电力系统发展新要求的市场信号,成为关注的焦点。

针对此类问题,美国各电力市场采用不同交易模式,在市场机制中强调资源的调节性能。在调频市场领域,PJM[5]根据调频性能指标调整供应商报价,优先购买快速调频资源,提高系统 5 min 内的有功平衡能力。文献[6]总结美国各市场区域基于调频效果的补偿机制,给出调频里程和调频性能指标的具体计算方法。此外,加州、MISO 建立了新的灵活爬坡市场,提高了快速爬坡资源的收益,有效缓解了系统 5~15 min 时间段[7]内爬坡能力的不足。文献[8]介绍了灵活爬坡服务的基本概念与市场均衡模型;文献[9]给出了 MISO 含爬坡约束的安全经济调度模型,通过单时段、多时段耦合算例分析其作用。借鉴此类设计思路,本文将资源的调节性能纳入主能量市场出清机制,以期在更长时间尺度下减轻电网的调节压力,并充分引导优质资源发展;根据机组性能指标在净负荷上升和下降阶段差异化调整报价,增加优质资源的中标机会,并发挥其调节优势。

负荷响应作为电源调度的补充,拥有巨大的调节潜力。根据美国能源联邦委员会的评估[10],到 2020 年美国的需求响应将有 4%~20%的调峰潜力,因此在高比例可再生能源环境下,有必要通过负荷的互动参与来减轻系统调节压力[11]。在电力市场背景下,负荷聚合商(LA)作为一类市场主体参与市场竞争,可以通过整合不同类型的用户,释放需求响应潜力,参与市场调度安排。然而负荷侧的主观性较强,又易受多种因素干扰,其响应的不确定性会给系统实时平衡带来危害,增加额外调度成本。由于生产活动状态、决策主体心理以及管理技术等变量的作用,负荷侧的响应性能存在差异[12]。在市场交易中应建立评价指标予以区分,进而增加优质负荷响应资源的比例,降低系统的安全稳定运行风险。

本文在引入机组调节性能指标的基础上,进一步考虑 LA 参与市场下的负荷响应性能,提出了一种计及源荷双边性能指标的市场交易新模型。针对实际执行过程中的负荷响应偏差,本文采用截断正态分布描述偏差的随机分布,给定合理的响应偏差补偿规则,进而推导得到负荷响应性能指标,并设计两阶段差异化出清机制以协调 LA 参与市场。通过算例仿真结果说明了该模式的有效性。

1　源荷双边性能指标

1.1　电源侧调节性能指标

考虑到风、光等可再生能源的随机波动及其边

收稿日期:2017-12-08;**修回日期**:2018-09-26
基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFB0900100)
Project supported by the National Key R&D Program of China (2016YFB0900100)

际发电费用较低,不宜作为系统有功平衡的主动性调控资源,本文将可再生能源作为负扰动折算至负荷侧,并以文献[13]为基础,仅对常规机组从调节能力和调节效果两方面进行性能评估,具体指标见表1。

表1 常规机组性能指标

Table 1 Performance indexes of conventional units

性能指标		指标意义	计算方法
调节能力	爬坡比率 $D_{\mathrm{ramp},i}$	表征机组速度调节的灵活程度	机组 i 的爬坡速率与系统设定的爬坡速率参考值之比
	调峰深度 $D_{\mathrm{depth},i}$	表征机组提供调节幅度的能力	机组 i 的最大、最小技术出力之差与额定功率之比
调节效果	响应度 $D_{\mathrm{rsp},i}$	衡量整个考核周期内机组响应出清调度指令的平均准确程度	1减去考核周期内机组 i 实际出力相较出清调度出力的平均偏差率

常规发电机组的综合调节性能 Z_i 可表示为:

$$Z_i=\alpha_1 D_{\mathrm{ramp},i}+\alpha_2 D_{\mathrm{depth},i}+\alpha_3 D_{\mathrm{rsp},i} \tag{1}$$

其中,α_1、α_2、α_3 为指标权重系数。本文采用层析分析法(AHP)对权重系数做出合理假设,将评价结果 Z_i 映射到区间[a,b],得到各机组最终的调节性能指标 $k_{\mathrm{EM},i}$。指标区间可根据实际电力市场运行情况确定,以控制 $k_{\mathrm{EM},i}$ 对主能量市场出清的影响程度。本文中设置 $a=1$、$b=3$。

1.2 负荷响应性能指标

1.2.1 负荷响应特性系数

LA 整合大量可调的需求响应资源,提交投标计划,参与日前市场的竞价出清,根据出清容量安排需求侧资源在日内削减或者增加负荷,共同分摊中标结果。设削负荷投标的报价为正,增负荷投标的报价为负,其中负号表示 LA 向系统支付费用,则二者的报价曲线均呈阶梯上升。图1给出了 LA 参与市场投标的需求响应分段报价曲线 $p^{\mathrm{LA}}(Q)$,其中 Q 为投标容量。

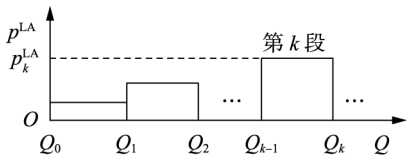

图1 LA 报价曲线

Fig.1 Bidding curve of LA

假设在日前市场中,某一 LA 在时段 t 的出清中标量用 l_t 表示,且 $l_t\geqslant 0$,实际执行量相对于日前计划的偏差为 ε_t。并用下标 p、n 区分增负荷、削负荷计划,则对于增负荷安排,有 $l_t=l_{\mathrm{p},t}$,$\varepsilon_t=\varepsilon_{\mathrm{p},t}$,实际增量为 $L_{\mathrm{p},t}=l_{\mathrm{p},t}+\varepsilon_{\mathrm{p},t}$;对于削负荷安排,有 $l_t=l_{\mathrm{n},t}$,$\varepsilon_t=\varepsilon_{\mathrm{n},t}$,实际削减量为 $L_{\mathrm{n},t}=l_{\mathrm{n},t}+\varepsilon_{\mathrm{n},t}$。

负荷的响应性能表现在 LA 所整合负荷资源的履约情况。不同 LA 的调控资源种类及用户信用风险存在差异,对用户的激励措施和整合能力也不同,因此其响应的不确定程度存在个体差异性。不同于常规机组,LA 聚集了大量中小用户,负荷控制能力较弱且呈现一定的概率特性,因此本文引入概率模型描述其响应性能,并区分不同性能带来的运行成本差异。

由于负荷侧资源具有规模大、独立且分散的特性,负荷响应偏差的随机分布可用截断正态分布[14]表示。将标准正态分布的概率密度函数和分布函数分别记为 $\varphi(\delta)$ 和 $\Phi(\delta)$,则对于截断正态分布 $\delta\sim \mathrm{N}(\mu,\sigma^2,\delta_{\mathrm{l}},\delta_{\mathrm{r}})$,其概率密度函数和期望[15]分别为:

$$f(\delta)=\begin{cases}\dfrac{\varphi\left(\dfrac{\delta-\mu}{\sigma}\right)}{\sigma\left[\Phi\left(\dfrac{\delta_{\mathrm{r}}-\mu}{\sigma}\right)-\Phi\left(\dfrac{\delta_{\mathrm{l}}-\mu}{\sigma}\right)\right]} & \delta_{\mathrm{l}}<\delta<\delta_{\mathrm{r}}\\ 0 & \delta\leqslant\delta_{\mathrm{l}},\delta\geqslant\delta_{\mathrm{r}}\end{cases} \tag{2}$$

$$E(\delta)=\mu+\sigma\frac{\varphi\left(\dfrac{\delta_{\mathrm{l}}-\mu}{\sigma}\right)-\varphi\left(\dfrac{\delta_{\mathrm{r}}-\mu}{\sigma}\right)}{\Phi\left(\dfrac{\delta_{\mathrm{r}}-\mu}{\sigma}\right)-\Phi\left(\dfrac{\delta_{\mathrm{l}}-\mu}{\sigma}\right)} \tag{3}$$

对于增负荷调度安排,响应偏差的最大值为增负荷总量;对于削负荷安排,响应偏差的最大值为削负荷总量。因此设定响应偏差的截断上、下限分别为正、负中标容量,可表示为 $\varepsilon_t\sim \mathrm{N}(0,\sigma^2,-l_t,l_t)$。其中,违约电量的方差大小不仅与用户响应特性有关,也与中标容量有关,为区分 LA 的具体特性,定义响应特性系数 η,其值为违约量标准差与中标容量的比值:

$$\eta=\sigma/l_t \tag{4}$$

η 可由历史数据进行估计,计算方法为:

$$\eta=\sqrt{\frac{1}{n_{\mathrm{rsp}}}\sum_{k=1}^{n_{\mathrm{rsp}}}(\varepsilon_k/l_k)^2} \tag{5}$$

其中,n_{rsp} 为统计的考核时段数;ε_k、l_k 分别为考核时段 k 下 LA 的响应偏差、中标容量。

1.2.2 考虑响应不确定性的补偿规则

负荷实际执行过程中有意或无意的响应偏差会对电网运行产生影响,应制定相应的奖惩措施。本文允许响应存在一定的偏差范围[$-d$,d],其中 d 为偏差阈值,其大小与中标容量有关,具体如下:

$$d=\gamma l_t \tag{6}$$

其中,γ 为偏差允许系数。

为鼓励 LA 严格按照中标容量执行响应负荷,本文采用"过响应不补、欠响应少算"的原则:若实际执行量过多,或者响应偏差在允许区域内,则按中标量进行补偿;若负荷响应实际执行量过少(欠响

应),且偏差超过允许范围,则根据报价曲线对偏差部分少算。补偿计算如下:

$$B_t^{\mathrm{LA}}=\begin{cases}\sum_{k=1}^{N_k} p_{k,t}^{\mathrm{LA}} l_{k,t}+p_t^{\mathrm{LA}}(l_t)\varepsilon_t & \varepsilon_t<-d\\ \sum_{k=1}^{N_k} p_{k,t}^{\mathrm{LA}} l_{k,t} & -d\leqslant\varepsilon_t\leqslant d\end{cases} \tag{7}$$

其中,B_t^{LA} 为 LA 在时段 t 执行调度安排获得的补偿,单位为 \$;N_k 为报价分段数;$p_{k,t}^{\mathrm{LA}}$ 为 LA 在时段 t 第 k 段容量的报价,单位为 \$/MW;$l_{k,t}$ 为第 k 段申报容量的中标量,单位为 MW,且 $l_t=\sum_{k=1}^{N_k} l_{k,t}$;$p_t^{\mathrm{LA}}(l_t)$ 为时段 t 下中标量在报价曲线上的对应价格。

此外,LA 执行增负荷安排的过响应,即 $L_{\mathrm{p},t}>l_{\mathrm{p},t}$,或削负荷安排的欠响应,即 $L_{\mathrm{n},t}<l_{\mathrm{n},t}$,会增加电源额外调度出力,应对此进行惩罚:

$$F_t^{\mathrm{LA}}=c_0\,|\varepsilon_t| \quad \varepsilon_{\mathrm{p},t}>d;\varepsilon_{\mathrm{n},t}<-d \tag{8}$$

其中,c_0 为日内额外调度成本,单位为 \$/MW,其可由历史统计数据确定。

则 LA 在时段 t 执行负荷响应计划的总成本为:

$$C_t^{\mathrm{LA}}=B_t^{\mathrm{LA}}+F_t^{\mathrm{LA}} \tag{9}$$

1.2.3　计及负荷响应性能的成本分析

根据式(7)—(9),LA 调度安排的期望成本为:

$$E(C_t^{\mathrm{LA}})=\sum_{k=1}^{N_k} p_{k,t}^{\mathrm{LA}} l_{k,t}+\int_{-l_t}^{-d} p_t^{\mathrm{LA}}(l_t)\varepsilon_t f(\varepsilon_t)\,\mathrm{d}\varepsilon_t+ c_0\int_{d}^{l_t}\varepsilon_t f(\varepsilon_t)\,\mathrm{d}\varepsilon_t \tag{10}$$

采用 LA 报价的加权平均值 $\bar{p}_t^{\mathrm{LA}}$ 近似计算式(10)中的 $p_t^{\mathrm{LA}}(l_t)$ 可得:

$$E(C_t^{\mathrm{LA}})\approx\sum_{k=1}^{N_k} p_{k,t}^{\mathrm{LA}} l_{k,t}+(c_0-\bar{p}_t^{\mathrm{LA}})\int_{d}^{l_t}\varepsilon_t f(\varepsilon_t)\,\mathrm{d}\varepsilon_t \tag{11}$$

$$\bar{p}_t^{\mathrm{LA}}=\sum_{k=1}^{N_k} p_{k,t}^{\mathrm{LA}}(Q_k-Q_{k-1})\Big/\sum_{k=1}^{N_k}(Q_k-Q_{k-1}) \tag{12}$$

利用式(3)计算式(11),得到负荷调度安排的期望成本为:

$$E(C_t^{\mathrm{LA}})=\sum_{k=1}^{N_k} p_{k,t}^{\mathrm{LA}} l_{k,t}+(c_0-\bar{p}_t^{\mathrm{LA}})\times \frac{1}{2}\frac{\varphi(d/\sigma)-\varphi(l_t/\sigma)}{\Phi(l_t/\sigma)-\Phi(0)}\sigma \tag{13}$$

根据式(4)、(6)以及 $\sigma=\eta l_t=\eta\sum_{k=1}^{N_k} l_{k,t}$,式(13)可以表示为:

$$E(C_t^{\mathrm{LA}})=\sum_{k=1}^{N_k}\left[p_{k,t}^{\mathrm{LA}}+(c_0-\bar{p}_t^{\mathrm{LA}})\times \frac{1}{2}\frac{\varphi(\gamma/\eta)-\varphi(1/\eta)}{\Phi(1/\eta)-\Phi(0)}\eta\right]l_{k,t} \tag{14}$$

在此基础上,本文提出负荷响应性能指标 k_{LA},表示 LA 在实际执行过程中的履约程度,旨在鼓励优质负荷资源积极提供该服务,计算公式如下:

$$k_{\mathrm{LA}}=\frac{1}{2}\frac{\varphi(\gamma/\eta)-\varphi(1/\eta)}{\Phi(1/\eta)-\Phi(0)}\eta \tag{15}$$

则 LA 考虑负荷响应性能指标的增负荷或削负荷期望成本可以表示为:

$$E(C_t^{\mathrm{LA}})=\sum_{k=1}^{N_k}\left[p_{k,t}^{\mathrm{LA}}+(c_0-\bar{p}_t^{\mathrm{LA}})k_{\mathrm{LA}}\right]l_{k,t} \tag{16}$$

由式(15)可知,k_{LA} 只与系统的偏差允许系数 γ 以及各 LA 的响应特性系数 η 有关,图 2 给出了 k_{LA} 与 η 的正相关关系,可见对于履约状况较优的聚合商而言,其响应特性系数较小,对应的负荷响应性能指标也较小,根据式(16)得到报价相同时其期望成本会更低。

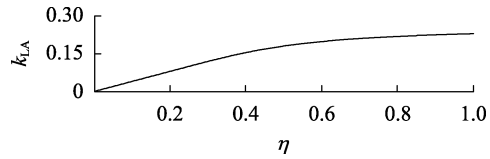

图 2　负荷响应性能指标与响应特性系数之间的关系

Fig.2　Relationship between k_{LA} and η

2　计及双边性能指标的市场交易模式

2.1　出清机制设置

在市场出清之前,根据机组上报的技术参数评估爬坡比率 D_{ramp} 和调峰深度 D_{depth}。统计考核周期内的执行情况,计算机组的响应度指标 D_{rsp}、LA 的响应特性系数 η。将性能评估结果作为机组和 LA 报价的部分内容,成为市场出清的依据之一。电源侧的主能量报价经机组性能指标调整后如下:

$$\tilde{p}_{i,t}^{\mathrm{E}}=\frac{p_{i,t}^{\mathrm{E}}}{k_{\mathrm{EM},i}} \tag{17}$$

其中,$p_{i,t}^{\mathrm{E}}$、$\tilde{p}_{i,t}^{\mathrm{E}}$ 分别为机组 i 在时段 t 的主能量报价、指标调整后的报价,单位为 \$/MW。由式(17)可知,性能优良的机组,指标值更高,调整后的报价更具优势。

令 $\tilde{p}_{j,k,t}^{\mathrm{LA}}$ 为聚合商 j 在时段 t 的第 k 段容量报价经负荷响应性能指标调整之后的报价,其单位为 \$/MW。根据式(16),有:

$$\tilde{p}_{j,k,t}^{\mathrm{LA}}=p_{j,k,t}^{\mathrm{LA}}+(c_0-\bar{p}_{j,t}^{\mathrm{LA}})k_{\mathrm{LA},j} \tag{18}$$

由于出清价格经过折算不能覆盖电源和 LA 的实际成本,因此按实际报价成本支付[16]方式结算。

为实现经济性和灵活性的统一,电源侧采用差异化出清模式:净负荷上升阶段使用机组性能指标调整过的主能量报价,以增加优质调节机组中标概率;净负荷下降阶段使用原始主能量报价,优先降低

高价机组的出力。若所有时段均为调整报价,不仅无法针对性地发挥优质机组的调节作用,且经济性差;若仅在净负荷下降时采用调整报价,则减少了优质机组的调节机会。由于净负荷上升和下降阶段的机组报价不统一,未能真实反映系统对负荷侧资源的需求,因此设置两阶段出清模式合理协调负荷资源,在第一阶段仅基于负荷响应性能指标调整 LA 报价,与原始报价的机组进行联合优化出清,得到 LA 出力安排;在第二阶段再根据电源侧性能指标,对常规机组进行差异化出清。日前市场的两阶段差异化出清机制如图 3 所示。

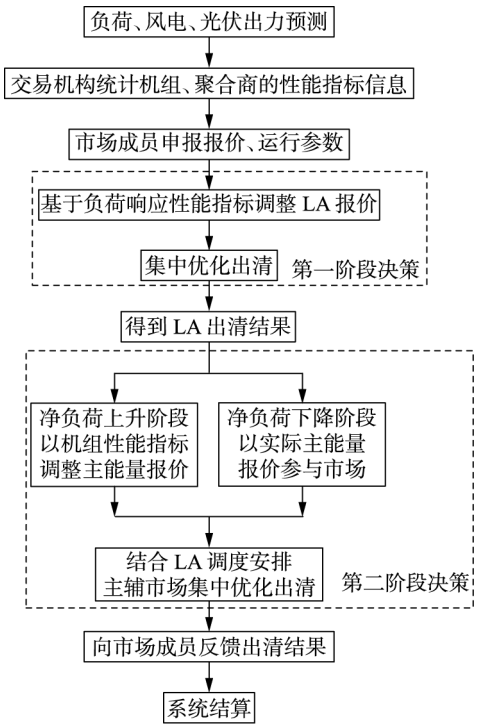

图 3 基于性能指标的两阶段出清流程图

Fig.3 Flowchart of two-stage clearing process based on performance indexes

2.2 考虑性能指标的主辅联合市场出清模型

2.2.1 市场出清目标

市场出清目标为最小化系统总运行成本,包括系统主能量市场费用、调频市场费用、旋转备用购买费用、灵活爬坡市场费用、机组的启动成本、LA 的期望成本以及弃风弃光、切负荷的损失成本。

第一阶段决策的目标函数如下:

$$\min \sum_{t=1}^{T}\sum_{i\in N_G}(p_{i,t}^{E}P_{G,i,t}+p_{i,t}^{R}R_{i,t}+p_{i,t}^{A}A_{i,t}+p_{i,t}^{Fu}F_{i,t}^{u}+p_{i,t}^{Fd}F_{i,t}^{d})+\sum_{t=1}^{T}\sum_{i\in N_G}x_{i,t}(1-x_{i,t-1})S_i+\sum_{t=1}^{T}\sum_{j\in N_{LA}}\sum_{k=1}^{N_k}(\tilde{p}_{p,j,k,t}^{LA}l_{p,j,k,t}+\tilde{p}_{n,j,k,t}^{LA}l_{n,j,k,t})+\sum_{t=1}^{T}(C_{load}P_t^{LC}+C_{wind}P_t^{WC}+C_{solar}P_t^{SC}) \tag{19}$$

其中,T 为出清时段数;N_G 为常规机组集合;N_{LA} 为 LA 集合;$p_{i,t}^{E}$、$p_{i,t}^{R}$、$p_{i,t}^{A}$ 和 $p_{i,t}^{Fu}$、$p_{i,t}^{Fd}$ 分别为机组 i 在时段 t 的主能量报价、调频容量报价、旋转备用容量报价和向上、向下爬坡容量报价,单位为 \$/MW,$P_{G,i,t}$、$R_{i,t}$、$A_{i,t}$、$F_{i,t}^{u}$、$F_{i,t}^{d}$ 分别为对应的中标容量,单位为 MW;$x_{i,t}$ 为启停状态;S_i 为启动成本,单位为 \$/次;P_t^{LC}、P_t^{WC}、P_t^{SC} 分别为在时段 t 的削负荷、弃风量、弃光量,单位为 MW,C_{load}、C_{wind}、C_{solar} 分别为对应的损失成本,单位为 \$/MW。

第二阶段决策不包含 LA 的成本,并且要根据不同时段将机组的主能量价格差异化,目标函数如下:

$$\min \sum_{t\in I}\sum_{i\in N_G}\tilde{p}_{i,t}^{E}P_{G,i,t}+\sum_{t\notin I}\sum_{i\in N_G}p_{i,t}^{E}P_{G,i,t}+\sum_{t=1}^{T}\sum_{i\in N_G}x_{i,t}(1-x_{i,t-1})S_i+\sum_{t=1}^{T}\sum_{i\in N_G}(p_{i,t}^{R}R_{i,t}+p_{i,t}^{A}A_{i,t}+p_{i,t}^{Fu}F_{i,t}^{u}+p_{i,t}^{Fd}F_{i,t}^{d})+\sum_{t=1}^{T}(C_{load}P_t^{LC}+C_{wind}P_t^{WC}+C_{solar}P_t^{SC}) \tag{20}$$

其中,I 为发电负荷曲线上升时段集合。

2.2.2 市场出清的约束条件

市场出清需要满足系统功率平衡约束、机组的技术出力约束、辅助服务需求约束、弃光弃风和切负荷容量约束以及 LA 约束。

功率平衡约束:

$$\sum_{i\in N_G}P_{G,i,t}+\sum_{j\in N_{LA}}\sum_{k=1}^{N_k}(l_{n,j,k,t}-l_{p,j,k,t})=(P_{L,t}-P_t^{LC})-(P_{wind,t}-P_t^{WC})-(P_{solar,t}-P_t^{SC})\quad \forall t \tag{21}$$

机组出力上下限约束:

$$P_{G,i,t}+R_{i,t}+A_{i,t}\leqslant P_{G,i,max}\quad \forall i,t \tag{22}$$

$$P_{G,i,t}-R_{i,t}\geqslant P_{G,i,min}\quad \forall i,t \tag{23}$$

机组爬坡约束:

$$-R_{u,i}\leqslant P_{G,i,t}-P_{G,i,t-1}\leqslant R_{u,i}\quad \forall i,t \tag{24}$$

机组启停时间约束:

$$x_{i,t}(1-x_{i,t-1})\left(\sum_{n=t}^{t+T_{on,i}-1}x_{i,n}-T_{on,i}\right)\geqslant 0\quad \forall i,t \tag{25}$$

$$x_{i,t-1}(1-x_{i,t})\left[\sum_{n=t}^{t+T_{off,i}-1}(1-x_{i,n})-T_{off,i}\right]\geqslant 0\quad \forall i,t \tag{26}$$

调频市场容量约束和需求约束:

$$0\leqslant R_{i,t}\leqslant R_{max,i}\quad \forall i,t \tag{27}$$

$$\sum_{i\in N_G}R_{i,t}\geqslant R_{D,t}\quad \forall t \tag{28}$$

旋转备用市场容量约束和需求约束:

$$0\leqslant A_{i,t}\leqslant A_{max,i}\quad \forall i,t \tag{29}$$

$$\sum_{i\in N_G} A_{i,t} \geqslant A_{D,t} \quad \forall t \tag{30}$$

灵活爬坡市场容量约束、需求约束及爬坡约束:

$$\sum_{i\in N_G} F^{u}_{i,t} \geqslant F^{u}_{D,t} \quad \forall t \tag{31}$$

$$\sum_{i\in N_G} F^{d}_{i,t} \geqslant F^{d}_{D,t} \quad \forall t \tag{32}$$

$$0 \leqslant F^{u}_{i,t}, F^{d}_{i,t} \leqslant R_{f,i} \quad \forall i,t \tag{33}$$

$$\left|(P_{G,i,t+1}-P_{G,i,t})/4+F^{u}_{i,t+1}+F^{d}_{i,t}\right| \leqslant R_{f,i} \quad \forall i,t \tag{34}$$

$$\left|(P_{G,i,t+1}-P_{G,i,t})/4-F^{d}_{i,t+1}-F^{u}_{i,t}\right| \leqslant R_{f,i} \quad \forall i,t \tag{35}$$

弃光、弃风和切负荷容量约束:

$$0 \leqslant P^{SC}_{t} \leqslant P_{solar,t} \tag{36}$$

$$0 \leqslant P^{WC}_{t} \leqslant P_{wind,t} \tag{37}$$

$$0 \leqslant P^{LC}_{t} \leqslant P_{L,t} + \sum_{j\in N_{LA}} \sum_{k=1}^{N_k} l_{p,j,k,t} - \sum_{j\in N_{LA}} \sum_{k=1}^{N_k} l_{n,j,k,t} \tag{38}$$

以可转移负荷为例,LA 需满足的约束如下:

$$-L^{DR}_{max} \leqslant \sum_{j\in N_{LA}} \sum_{k=1}^{N_k} (l_{p,j,k,t}-l_{n,j,k,t}) \leqslant L^{DR}_{max} \quad \forall t \tag{39}$$

$$\begin{cases} y_{p,j,k+1,t}(Q_k-Q_{k-1}) \leqslant l_{p,j,k,t} \leqslant y_{p,j,k,t}(Q_k-Q_{k-1}) & k<N_k \\ 0 \leqslant l_{p,j,k,t} \leqslant y_{p,j,k,t}(Q_k-Q_{k-1}) & k=N_k \\ y_{p,j,k,t}(y_{p,j,k-1,t}-1)=0 & 1<k\leqslant N_k \end{cases} \tag{40}$$

$$\begin{cases} y_{n,j,k+1,t}(Q_k-Q_{k-1}) \leqslant l_{n,j,k,t} \leqslant y_{n,j,k,t}(Q_k-Q_{k-1}) & k<N_k \\ 0 \leqslant l_{n,j,k,t} \leqslant y_{n,j,k,t}(Q_k-Q_{k-1}) & k=N_k \\ y_{n,j,k,t}(y_{n,j,k-1,t}-1)=0 & 1<k\leqslant N_k \end{cases} \tag{41}$$

$$\sum_{t=1}^{T} \sum_{k=1}^{N_k} (l_{p,j,k,t}-l_{n,j,k,t}) = 0 \quad \forall j\in N_{LA} \tag{42}$$

其中,$P_{L,t}$、$P_{wind,t}$、$P_{solar,t}$分别为在时段 t 的负荷、风电、光伏出力大小,单位为 MW;$R_{u,i}$、$R_{f,i}$分别为机组 i 每小时和每 15 min 的最大增/减出力,单位为 MW;$T_{on,i}$、$T_{off,i}$分别为机组 i 的最小开、停机时间,单位为 h;$R_{D,t}$、$A_{D,t}$分别为系统调频容量需求、旋转备用需求,单位为 MW;$R_{max,i}$、$A_{max,i}$分别为机组 i 的调频、旋转备用申报容量,单位为 MW;$F^{u}_{D,t}$、$F^{d}_{D,t}$分别为系统在时段 t 向上、向下爬坡需求容量,单位为 MW;L^{DR}_{max}为系统需求响应资源总量限制,单位为 MW;$y_{p,j,k,t}$、$y_{n,j,k,t}$分别为聚合商 j 在时段 t 的第 k 段容量是否增负荷、削负荷的 0-1 变量,取值为 1 表示中标,取值为 0 表示未中标。

约束条件中,式(34)、(35)表示机组爬坡能力不仅要满足相邻时段的出力增量,还要为高比例可再生能源环境下 15 min 尺度的不确定波动预留向上、向下的爬坡容量,系数 1/4 表示 1 h 与 15 min 的时间换算;式(40)、(41)保证 LA 报价区间每段的中标量均在申报范围内,且满足从低价段到高价段的顺序;式(42)表示 1 d 的增负荷与削负荷出清总量相等。

基于上述优化模型求得第一阶段的 LA 调度安排,将所得的 $l_{p,j,k,t}$、$l_{n,j,k,t}$代入式(21)得到第二阶段的决策约束,第二阶段的约束不包含式(39)—(42)。

本文所构建的计及源荷双边性能指标的市场交易模型易转化为混合整数线性规划问题,因此采用 Cplex 软件进行求解。

3　算例分析

3.1　算例数据

本文以上海某日负荷及崇明风机预测出力为基准,再假定光伏曲线,经适当比例调整以模拟高比例可再生能源下的市场环境。系统内有 8 台燃煤机组、3 台燃气机组,负荷信息及机组运行参数和报价见文献[13]。设系统爬坡速率参考值为所有机组中的最大爬坡速率,表 2 为根据机组信息计算得到的性能指标。灵活爬坡产品报价取高峰发电报价的 1/4,系统调频备用、旋转备用需求分别取日最高负荷的 2% 和 5%,需求响应总量限制为最高负荷的 15%。系统切负荷损失为 150 \$/MW,弃风弃光损失为 100 \$/MW。

表 2　机组性能指标

Table 2　Performance indexes of units

机组	k_{EM}	机组	k_{EM}	机组	k_{EM}
煤电 1	1.571	煤电 5	1.292	燃气 1	3.000
煤电 2	1.636	煤电 6	1.044	燃气 2	2.241
煤电 3	1.479	煤电 7	1.069	燃气 3	2.151
煤电 4	1.290	煤电 8	1.000		

假定有 2 个 LA 参与日前市场交易,根据 2015 年 PJM 统计用户单位购电成本[17]令 $c_0=56.8$ \$/MW。根据 LA_1 响应特性系数为 0.15,LA_2 响应特性系数为 0.02,$\gamma=0.000\ 5$,可计算得到 LA_1 的性能指标为 0.059 84,LA_2 的性能指标为 0.007 98。聚合商基本报价信息见表 3。

表 3　LA 报价信息

Table 3　Bidding information of LA

响应容量/MW	LA_1 报价/(\$·MW^{-1})		LA_2 报价/(\$·MW^{-1})	
	削负荷	增负荷	削负荷	增负荷
[0,40]	14	-5	16	-4
(40,100]	20	-4	20	-3
(100,180]	22	-3	26	-2

3.2　出清结果分析

为阐明本文出清机制的特点,本文对以下 4 种交易模式进行比较分析:模式 1 为 LA 不参与,不考虑电源侧性能指标;模式 2 为 LA 不参与,考虑电源侧指标;模式 3 为 LA 参与,仅考虑电源侧指标,不考

虑负荷侧指标;模式4为LA参与,考虑源荷双边性能指标。图4给出了4种模式下发电机组的出力安排,表4列出了4种模式下的计算结果。

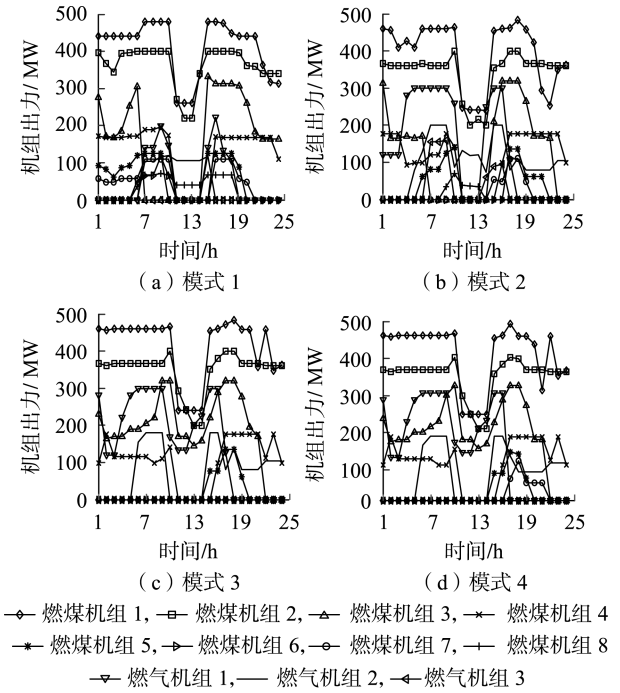

图4 主能量市场出清结果

Fig.4 Clearing results of main energy market

表4 4种模式运行成本比较

Table 4 Comparison of operating costs among four modes

目标	运行成本/$			
	模式1	模式2	模式3	模式4
主能量市场	596 659.6	619 461.1	603 066.9	602 859.8
调频市场	9 547.2	7 088.5	7 582.2	7 581.5
备用市场	11 535.4	10 229.6	9 953.0	9 880.4
向上爬坡市场	3 768.1	3 435.5	2 682.1	2 652.8
向下爬坡市场	3 993.6	3 799.9	3 318.8	3 263.8
启停	3 795	4 225	1 850	2 145
弃风弃光	14 928	10 766.7	0	0
切负荷	0	0	0	0
LA调度	0	0	6 223.6	8 435.2
合计	644 226.9	659 006.3	634 676.6	636 818.5

图4结果表明,模式2—4在基于电源侧性能指标的主能量市场差异化出清机制下,灵活优质发电机组的出清比例得到提高:优质燃气机组1、2得到更多出力的机会,增加了市场收益,而性能指标较差的燃煤机组6—8得到的出力安排明显减少。此外,模式2—4中,高价但指标占优的燃气机组1、2跟踪净负荷峰谷变化调节出力大小,有效发挥了灵活调节优势:相较于模式1,模式2中燃煤机组调节里程降低4.4%;模式3和4在需求响应资源的协调参与下,燃煤机组调节里程进一步降低,分别减少17.2%和12.9%。可见基于电源性能指标的差异化出清机制能合理平衡收益与贡献度之间的关系,使得燃气机组在参与市场的同时发挥跟踪负荷的作用,减少了燃煤机组往复增减出力甚至启停带来的磨损和运行寿命缩减等成本。

表4结果表明,相比传统出清的模式1,模式2考虑电源性能指标的方式使得市场交易费用有所上升,但灵活优质机组的参与能更充分填补迅速变化的负荷需求,降低了弃风弃光损失成本。模式2下每千瓦时负荷约增加费用$0.0003,尚在可接受范围内,实际运行中,可通过区间$[a,b]$的合理设置来约束运行成本增长的幅度。相较于无需求响应资源的模式1、2,模式3、4中LA的参与降低了系统总运行成本。虽然考虑电源性能模式下市场交易费用会增多,但需求响应资源的联合调节削减了负荷高峰,从而降低了高成本机组出力,减少了系统爬坡容量需求,同时系统峰谷差的缩小也缓解了机组的频繁启停,使得系统发电成本、灵活爬坡市场费用和机组启停费用均有所降低。负荷响应资源的参与还改善了系统对可再生能源的消纳,在模式3、4中,弃风弃光损失为0。模式4考虑了负荷响应性能,在不计及违约惩罚的日前市场中,LA调度成本相比模式3有所增加。

3.3 负荷响应性能指标影响分析

模式3和4的区别在于是否考虑负荷侧性能指标,2种模式下LA出清结果如图5所示。

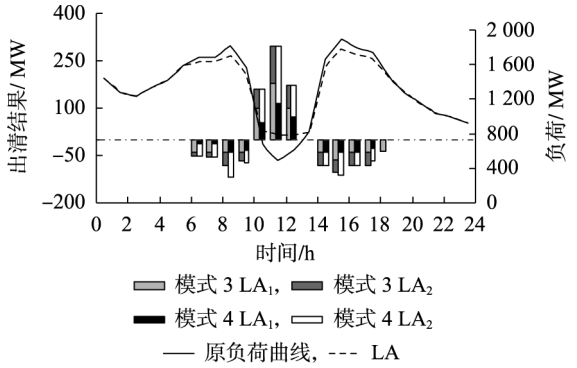

图5 出清结果比较

Fig.5 Comparison of clearing results

由图5的净负荷曲线可以得出,在需求响应资源的参与下,系统的发电负荷曲线明显趋缓,负荷需求攀升速度有所缓解。出清结果安排聚合商在净负荷曲线高峰时刻削减负荷,并将负荷转移至低谷时刻,起到了较好的削峰填谷的效果。此外,在不计及负荷响应特性差异的情况下,LA_1的报价较低,因此模式3中LA_1的调用容量更多。模式4综合考虑聚合商的响应性能与报价,负荷响应更为可靠的LA_2获得更多调用机会,提高了其参与市场的收益。显然模式4更利于激励LA通过技术手段改造或管控水平提升来改善响应性能,增强市场竞争力。

为阐明LA资源响应特性差异对运行可靠性的影响,本文根据负荷响应偏差的分布特性,模拟LA

的日内违约场景。通过 500 次蒙特卡洛模拟生成聚合商违约场景,假设日内备用的调用成本与主能量报价一致,分析比较 2 种模式下的系统运行成本差异,统计得出模式 3 下 LA_1、LA_2 日违约电量期望分别为 90.96、8 MW·h,合计为 98.96 MW·h;模式 4 下 LA_1、LA_2 日违约电量期望分别为 58.14、12.38 MW·h,合计为 70.52 MW·h。系统调度成本的期望值如表 5 所示。

表 5　系统调度成本比较

Table 5　Comparison of system scheduling cost

目标	调度成本/ $	
	模式 3	模式 4
日前电源	628 453.0	628 383.3
日前 LA	6 223.6	8 435.2
日内备用	4 039.5	2 827.1
日内弃风弃光损失	2 244.9	369.1
日内切负荷损失	1 847.7	229.9
合计	642 808.7	640 244.6

综上可知,由于模式 4 考虑负荷响应性能,增加了履约状况更佳的 LA_2 的中标量,降低了可靠性较差的 LA_1 的中标量,因此有效降低了市场的总体违约风险。相较于模式 3,模式 4 中 LA 的违约概率降低且不平衡电量期望减少,用于弥补违约电量的实时调度成本也明显降低。模式 3 在没有考虑负荷违约可能的情况下制定调度计划,虽然日前 LA 调度成本略低于模式 4,但模式 4 综合负荷响应性能指标的出清结果有效降低了日内调度成本,因此系统总体运行成本反而有所降低,更利于市场稳定运行。

4　结论

随着当前电力市场的改革,本文在主能量市场引入电源侧的评价指标,同时在负荷侧量化评估用户违约风险的负荷响应性能指标,通过电力市场交易模式的灵活设计,综合性能和成本优化调度安排,鼓励更多灵活、快速出力的机组发挥其调节优势,并协调需求响应资源参与市场,以应对高比例可再生能源环境对系统调节能力的需求。该交易模式有助于提高发电侧和负荷侧优质调节资源的市场竞争力,LA 可通过优化资源整合策略,合理设计销售合同与奖惩机制等措施改善履约状况,从而增强市场竞争力。系统优质灵活可靠资源的比重增加,有利于提高市场运行稳定性,降低系统运行风险。

参考文献:

[1] California Independent System Operator. What the duck curve tells us about managing a green grid[EB/OL]. (2016-04-29)[2017-12-08]. http://www.caiso.com/Documents/FlexibleResourcesHelpRenewables_FastFacts.pdf.

[2] 肖定垚,王承民,曾平良,等. 考虑可再生能源电源功率不确定性的电源灵活性评价[J]. 电力自动化设备,2015,35(7):120-125,139.
XIAO Dingyao,WANG Chengmin,ZENG Pingliang,et al. Power source flexibility evaluation considering renewable energy generation uncertainty[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(7):120-125,139.

[3] 梅天华,甘德强,谢俊. 燃煤发电机组调停调峰成本的公平分摊[J]. 电力自动化设备,2016,36(12):69-74.
MEI Tianhua,GAN Deqiang,XIE Jun. Fair allocation of coal-fired unit shutdown cost for peaking in valley time[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(12):69-74.

[4] 徐国栋,程浩忠,马紫峰,等. 用于缓解电网调峰压力的储能系统规划方法综述[J]. 电力自动化设备,2017,37(8):3-11.
XU Guodong,CHENG Haozhong,MA Zifeng,et al. Overview of ESS planning methods for alleviating peak-shaving pressure of grid[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(8):3-11.

[5] PJM. PJM manual 11:energy & ancillary services market operations[EB/OL]. (2017-01-01)[2017-12-08]. http://www.pjm.com/~/media/committees-groups/committees/mrc/20170323/20170323-item-11-regulation-market-issue-senior-task-force-draft-manual-11-revisions.ashx.

[6] 陈达鹏,荆朝霞. 美国调频辅助服务市场的调频补偿机制分析[J]. 电力系统自动化,2017,41(18):1-9.
CHEN Dapeng,JING Zhaoxia. Analysis of frequency modulation compensation mechanism in frequency modulation ancillary service market of United States[J]. Automation of Electric Power Systems,2017,41(18):1-9.

[7] KHALED H. ABDUL-RAHMAN,HANI A,et al. Enhanced system reliability using flexible ramp constraint in CAISO market[C]//2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting. San Diego,CA,USA:IEEE,2012:1-6.

[8] 郭鸿业,陈启鑫,夏清,等. 电力市场中的灵活调节服务:基本概念、均衡模型与研究方向[J]. 中国电机工程学报,2017,37(11):3057-3066,3361.
GUO Hongye,CHEN Qixin,XIA Qing,et al. Flexible ramping product in electricity markets:basic concept,equilibrium model and research prospect[J]. Proceedings of the CSEE,2017,37(11):3057-3066,3361.

[9] NIVAD N,GARY R. Market solutions for managing ramp flexibility with high penetration of renewable resource[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy,2012,3(4):784-790.

[10] The Brattle Group Freeman,Sullivan & Co Global Energy Partners,LLC. A national assessment of demand response potential[R]. [S.l.]:Fe-deral Energy Regulatory Commission,2009.

[11] 孙盛鹏,刘凤良,薛松. 需求侧资源促进可再生能源消纳贡献度综合评价体系[J]. 电力自动化设备,2015,35(4):77-83.
SUN Shengpeng,LIU Fengliang,XUE Song. Comprehensive evaluation system for contribution degree of demand-side resources to renewable energy source integration[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(4):77-83.

[12] GOLDMAN C,HOPPER N,BHARVIRKAR R,et al. Estimating demand response market potential among large commercial and industrial[R]. Berkeley,CA,USA:Lawrence Berkeley National Laboratory,2007.

[13] 陈杏,宋依群. 高比例可再生能源环境下考虑绩效的发电出清模式研究[J]. 水电能源科学,2017,35(10):211-216.
CHEN Xing,SONG Yiqun. Research on performance based clearing model for units under high proportion of renewable energy resources[J]. Water Resources and Power,2017,35(10):211-216.

[14] 张开宇,宋依群,严正. 考虑用户违约可能的负荷聚合商储能配置策略[J]. 电力系统自动化,2015,39(17):127-133.
ZHANG Kaiyu,SONG Yiqun,YAN Zheng. Energy storage capacity optimization for load aggregators considering probability of demand response resources' breach[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(17):127-133.

[15] 章栋恩. 截断正态分布参数估计的EM算法[J]. 北京轻工业学院学报,1998(2):74-78.
ZHANG Dongen. Estimation of parameter for truncated normal distribution via the EM algorithm[J]. Journal of Beijing Institute of Light Industry,1998(2):74-78.

[16] 施展武,杨莉,甘德强. PAB和MCP电价机制下考虑不同容量水平的市场均衡分析[J]. 电力系统自动化,2005,29(19):10-13.
SHI Zhanwu,YANG Li,GAN Deqiang. A price completion model in MCP and PAB pricing considering different capacity constraints[J]. Automation of Electric Power Systems,2005,29(19):10-13.

[17] 2015 state of the market report for PJM[EB/OL]. (2016-03-31)[2017-12-08]. http://www.pjm.com/~/media/commtees-groups/committees/mc/20160331-state-of-market-report-review/20160331-som-presentation.ashx.

作者简介:

索瑞鸿

索瑞鸿(1994—),女,山西吕梁人,硕士研究生,研究方向为电力市场(**E-mail**:srh@sjtu.edu.cn);

陈 杏(1992—),女,福建连江人,硕士,主要研究方向为电力市场(**E-mail**:chenxing0050@163.com);

宋依群(1970—),女,浙江宁波人,副教授,博士,主要研究方向为电力市场以及电力系统分析(**E-mail**:yqsong@sjtu.edu.cn)。

Trading model considering bilateral performance indexes of generation and load

SUO Ruihong[1],CHEN Xing[1],SONG Yiqun[1],YAN Zheng[1],YAO Liangzhong[2]

(1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion,Ministry of Education,Department of Electrical Engineering,Shanghai Jiao Tong University,Shanghai 200240,China;2. China Electric Power Research Institute,Beijing 100192,China)

Abstract:To promote the development of high-quality controllable load and generators,and improve system's ability to maintain power balance under a high share of renewable energy sources,an electricity market trading model considering response performance of generation and load is proposed. At the power supply side,indices that evaluate the response ability of generators are introduced. At the electricity demand side,the case that load aggregators participating in the electricity market is considered. Also, an index that measures the response performance of load aggregators is established considering demand response uncertainties,in which the variation in operating costs with respect to the demand response performance can be identified. To ensure an optimal allocation of generator and demand resources,a two-stage market clearing framework is proposed. A day-ahead market clearing model that minimizes the operation cost is formulated,which includes the participation of load aggregators. Test results demonstrate that the proposed model contributes to an optimal allocation of both generator and demand resources,and hence reduces the market risk and possible losses.

Key words:electricity market;demand response performance;high share of renewable energy sources;market trading model;response performance

(上接第163页 continued from page 163)

Co-phase power supply system based on novel YNvd balanced transformer for electrified railway

CUI Guiping,LUO Longfu,LI Yong,LIU Yuxing,WANG Tao

(National Electric Power Conversion and Control Engineering Technology Research Center,Hunan University,Changsha 410082,China)

Abstract:To address the problems of reactive power,negative sequence,harmonic and passing over of neutral section in electrified railway traction power supply system,a co-phase traction power supply system that consists of novel YNvd balanced transformer and IPFC(Integrated Power Flow Controller) is proposed. Compared with the co-phase power supply system with traditional YNvd balanced transformers,the proposed approach saves a single-phase coupled step-down transformer by reasonably configuring the voltage level of the winding of the novel YNvd balanced transformer,which results in reduced investment cost and space of the entire equipment. Detailed compensation principle of the co-phase traction power supply system based on novel YNvd balanced transformer is analyzed. A current controller design method based on generalized integral iterative control algorithm is proposed to enable the error free tracking of the compensation current. Simulative results verify the feasibility and effectiveness of the proposed method and control strategy.

Key words:electric railways;YNvd balanced transformer;co-phase power supply;integrated power flow controller;generalized integral;neutral section