

计及可控负荷决策机制的输电网阻塞优化调控方法

可控负荷是近年来电力市场中输电网阻塞管理的重要手段。可控负荷服务商将根据市场价格决定其容量和价格申报值，而同时可控负荷的申报结果也将影响节点边际出清电价，从而导致出清电价呈现“动态过程”。为此，首先介绍节点边际电价模式，分析可控负荷服务商在节点边际电价模式下的决策机制，构建可控负荷参与输电网阻塞管理的决策模型。在此基础上，考虑可控负荷决策机制对节点边际电价的影响，提出了基于两层规划的动态输电网阻塞优化调控模型及求解算法。最后，基于IEEE-30节点系统的算例表明该方法能够保证可控负荷服务商收益，有利于激发其参与积极性。

王寅 孙斌 刘明顺/贵州电网有限责任公司电力调度控制中心
张德亮 郭少青 翟武悝/北京清大科越股份有限公司

0 引言

可控负荷参与阻塞管理已成为电力市场中消除阻塞的重要途径。特别是近年来随着风电等清洁能源快速发展，仅依赖传统电源调整的方法越发捉襟见肘^[1]。

文献[2]介绍了能源互联网中基于区块链的阻塞管理方法，可控负荷作为参与者能够实现与发电商平等的交易。文献[3]研究了可控负荷参与阻塞管理模型，并对可控负荷参与后电力市场的价格特性进行了细致的分析。文献[4]提出了电动汽车和可控负荷参与配电系统阻塞管理的市场机制，在节点边际电价模式下提出了静态定价的方法。文献[5]提出了基于可控负荷拍卖模型的电力双边交易阻塞管理模式，该模式中，可控负荷通过拍卖的方式形成响应价格。文献[6]提出了考虑需求侧响应的短期阻塞管理模型，并设计了其激励机制。

必须指出的是，在节点边际电价模式下，可控负荷参与阻塞管理，将改变原负荷分布情况下的节点边际电价。可控负荷服务商的报价决策将同时考虑其参与阻塞管理的收益和阻塞消除所带来的电价变化。因此，可控负荷参与阻塞管理后，节点边际电价将呈现“动态过程”^[7-8]。

本文立足于激励可控负荷积极参与阻塞优化调控问题，首先分析了可控负荷服务商的决策机制，提出了其决策分析模型。在此基础上结合输电网阻塞优化调控要求，构建了两阶段的计及可控负荷决策机制的动态阻塞优化调控模型和求解方法。最后，基于IEEE-30节点系统构造算例验证了本文所提出方法的有效性。

1 节点边际电价与可控负荷决策机制

1.1 传统的节点边际电价模式

节点边际电价是电力市场中常用的价格模式。节点电价的定义为系统向该节点供应电能的微增费率^[9]。节点边际电价可通过考虑网络安全约束的经济调度模型求解得到，即

$$\begin{aligned} \min & \mathbf{p}^T \mathbf{P}_G \\ \text{s. t. } & \begin{cases} \mathbf{e}^T (\mathbf{P}_G - \mathbf{P}_D) = 0 \\ \mathbf{T}(\mathbf{P}_G - \mathbf{P}_D) \leq \mathbf{F}^{\max} \\ \mathbf{P}_G^{\min} \leq \mathbf{P}_G \leq \mathbf{P}_G^{\max} \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

式中， $\mathbf{P}_G$ 为发电厂出力向量； $\mathbf{p}$ 为发电厂出力价格向量； $\mathbf{P}_D$ 为节点负荷向量； $\mathbf{e}$ 为



王寅/工程师

关键词/Keywords

可控负荷 ·
动态阻塞优化 ·
节点边际电价 ·
电力市场 ·

元素均为1的向量； T 为对角元素为节点对断面转移分布因子组成的对角矩阵； $F^{\max}$ 为断面的传输限值向量； $P_G^{\max}$ 、 $P_G^{\min}$ 分别为发电厂出力的上、下限向量。

式(1)为经典的经济调度模型，其优化目标为全网购电成本最低，约束条件分别为电力平衡约束、网络传输约束和机组出力上下限约束。

经济调度模型的拉格朗日函数可表示为

$$\begin{aligned} \Gamma = & p^T P_G + \lambda e^T (P_G - P_D) + \\ & \mu^T [T(P_G - P_D) - F^{\max}] + \\ & \tau_1^T (P_G - P_G^{\max}) + \tau_2^T (P_G^{\min} - P_G) \end{aligned} \quad (2)$$

式中， λ 、 μ 、 τ_1 和 τ_2 分别为各约束项所引入的拉格朗日乘子。

其最优化条件应满足

$$\frac{\partial \Gamma}{\partial P_{Gi}} = p_i + \lambda + \sum_{k=1}^{NB} \mu_k T_{ki} + \tau_{1i} - \tau_{2i} = 0 \quad (3)$$

式中， NB 为系统中节点数。

则根据节点边际电价的定义，编号为 i 的节点其边际电价可表示为

$$\rho = -\lambda e - T^T \mu \quad (4)$$

式中， ρ 为节点边际电价向量。

在节点边际电价模式下，调度机构将按照式(1)所示的经济调度模型调用发电出力。

(4)为各节点的出清电价，包括两个部分：第一部分为 λe ，其含义为全网不存在阻塞时的统一出清电价；第二部分为 $T^T \mu$ ，其含义为由于系统阻塞所导致的节点边际成本变化。

1.2 考虑可控负荷的静态阻塞管理模式

静态阻塞管理模式是当前解决含可控负荷的阻塞调控主要方法，该方法可以表示为^[3-4]

$$\begin{aligned} \min & p^T P_G + \pi \Delta P_D^* \\ \text{s. t.} & \begin{cases} e^T (P_G - P_D^*) = 0 \\ T(P_G - P_D) \leq F^{\max} \\ P_G^{\min} \leq P_G \leq P_G^{\max} \\ P_D^* = P_D - \Delta P_D^* \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

式中， π 为可控负荷服务商所获得的单位补偿价格向量； P_D^* 为参与中断后的节点负荷向量； P_D 为中断前节点负荷向量； ΔP_D^* 为调用的可控负荷电力。

之所以称上述优化决策为静态决策，原因在于该模型是基于可控负荷服务商报价决策恒定的前提条件。

而实际上可控负荷在其报价阶段也将细致地分析电网运行情况，综合考虑其参与阻塞管理的收益和所在节点的节点边际电价变化。上述假设条件没有细致地考虑可控负荷的决策机制可能造成出清结果不利于激发可控负荷参与阻塞管理积极性的问题。

1.3 可控负荷决策机制

可控负荷服务商在决定所提供的可中断服务报价和可控负荷电力时，将同时考虑参与可控负荷的服务回报和其购电成本的变化。

该决策机制可用如下模型表示

$$\begin{aligned} \min & -\pi_i^L \Delta P_{Di} + \rho_i P_{Di}^* \\ \text{s. t.} & \begin{cases} \Delta P_{Di}^{\min} \leq \Delta P_{Di} \leq \Delta P_{Di}^{\max} \\ P_{Di}^* = P_{Di}^b - \Delta P_{Di} \end{cases} \end{aligned} \quad (6)$$

式中， π_i^L 为可控负荷服务商所获得的单位补偿价格； ΔP_{Di} 为其所提供的可控负荷电力； ρ_i 为该可控负荷所在节点的节点边际电价； P_{Di}^* 为中断后的负荷电力； $\Delta P_{Di}^{\max}$ 、 $\Delta P_{Di}^{\min}$ 为可控负荷服务商所承诺的最大、最小可控负荷电力； P_{Di}^b 为控制前负荷电力。

由式(1)可知，传统的节点边际电价模式下各节点电价与系统负荷分布、各发电厂报价和其出力调节能力有关。当系统负荷分布改变时，系统阻塞情况变化将导致系统节点边际电价发生变化。

则根据阻塞情况可控负荷参与阻塞管理的意愿也有所不同。

(1) 受入阻塞区域

对于受入阻塞区域，可控负荷参与阻塞管理，减少其电力，能缓解断面阻塞情况，降低节点边际电价。此时，其一方面获得了阻塞管理补偿，同时也将享受节点边际电价降低带来的购电成本下降。这种情况下可控负荷的参与积极性较高。

(2) 送出阻塞区域

对于送出阻塞区域，可控负荷需要增加其电力，以缓解阻塞程度。尽管能够获得阻塞管理补

偿,但是如果其用电量的增加导致的电费上升不能得到完全补偿,则其参与积极性将大大下降。

为了能够解决上述问题,将可控负荷决策机制纳入阻塞调控分析,已成为阻塞优化调控的必然趋势。

2 基于两层规划的动态阻塞优化调控方法

2.1 两层规划模型

两层规划是动态规划领域常用的优化计算方法,其数学模型可表示为

$$\begin{aligned} \min_x F(x,y) \\ \text{s.t. } Q(x,y) \leq 0 \\ R(x,y) = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \min_y F(x,y) \\ \text{s.t. } q(x,y) \leq 0 \\ r(x,y) = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

式(7)为两层规划问题的主问题, $F(x,y)$ 、 $Q(x,y)$ 和 $R(x,y)$ 分别为主问题的优化目标函数、不等式约束项和等式约束项。式(8)为两层规划的子问题, $f(x,y)$ 、 $q(x,y)$ 和 $r(x,y)$ 分别为子问题的优化目标函数、不等式约束项和等式约束项。 x 为主问题的决策变量,也作为已知量带入子问题中进行优化求解; y 为子问题的决策变量,也作为已知量带入主问题中进行优化求解。

在动态规划问题中,往往涉及多个优化主体。不同决策主体需求不同,使得构建统一的优化模型进行全局优化往往难以实现。为此采用两层规划模型进行多目标分析已成为动态规划领域主要的分析手段。

2.2 基于两层规划的动态阻塞优化调控方法

本文所提出的考虑可控负荷决策机制的阻塞优化调控方法其实施流程如图1所示。考虑到节点边际电价出清和可控负荷决策是两个相互独立的过程,本文将该方法分为顺序执行的两个层面,通过迭代优化实施求解分析。

第一层为给定可控负荷报价的节点边际电价优化决策。该层优化模型见式(6)。在该层优

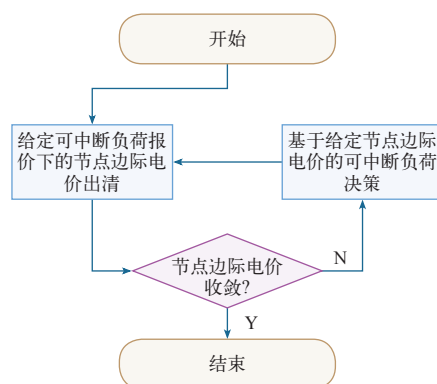


图1 两阶段决策流程

化模型中可控负荷报价作为优化变量进行统一规划。第二层为基于给定节点边际电价的节点可中断负荷决策。该层优化模型见式(5)。通过两层之间反复迭代实现对原问题的优化求解。

2.3 收敛条件判定分析

节点边际电价作为两层之间的衔接,由其在迭代过程中的数据变化情况作为收敛判据,即当前后两次节点边际电价向量的模小于给定收敛判定条件时,则原问题收敛。该判定条件可表示为

$$\|\rho_{n+1} - \rho_n\| \leq e \quad (9)$$

式中, ρ_n 、 ρ_{n+1} 分别为第 n 次和第 $n+1$ 次的节点边际电价向量,为给定的收敛判定条件。当满足该式时,则说明收敛。

3 算例分析

3.1 基础数据

本文将在IEEE-30节点系统基础上构造算例以验证本文所提出方法的有效性。IEEE-30节点系统的网络连接如图2所示。该系统中共有发电机

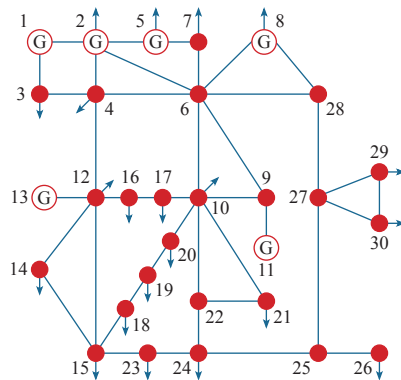


图2 IEEE-30节点系统

组6处,其基本参数如表1所示。

表1 机组参数

节点	最大技术出力/MW	最小技术出力/MW	电能价格/(元/MW·h)
1	100	0	280
2	100	0	250
5	80	0	250
8	100	0	280
11	110	0	320
13	50	0	330

3.2 结果分析

为了验证本文所提出的方法,本算例中设置线路6→10和线路6→9检修,则处于系统中下半部分的区域仅有两个电源分布,存在受入阻塞情况;而与此同时,上半部分区域电源供电能力较强,而负荷相对薄弱,存在送出阻塞问题。

本文分别设置两个场景的可控负荷,以分析本文所提出的优化方法其实施作用。

(1) 受入阻塞区域增加可控负荷

为了验证在受入阻塞区域增加可控负荷的情况,本文在节点10和节点12增加了两个可控负荷,其基本参数如表2所示。

表2 受入阻塞区域可控负荷参数

节点	最大可控负荷电力/MW	最低中断负荷报价/(元/MW)
10	200	50
12	200	40

设置可控负荷初始报价为其最低中断负荷报价,则基于本文所提出的优化方法,系统节点边际电价与可控负荷10和12的收益变化曲线如图3所示。

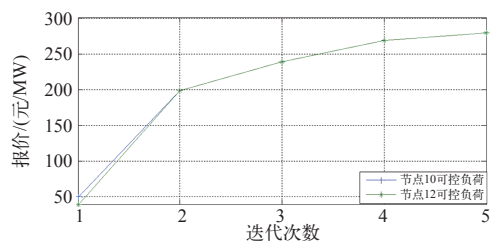


图3 受入阻塞区域报价变化

可以发现其报价最后收敛于280元/MW,且其可控负荷全部调用。

其原因在于当两个可控负荷全部调用后,可

将受入阻塞消除,使得下半区域的节点边际电价为280元/MW。而此时这两处可控负荷的收益也是最大的。

(2) 送出阻塞区域增加可控负荷

为了验证在送出阻塞区域增加可控负荷的情况,本文在节点3和节点4增加了两个可控负荷,其基本参数如表3所示。

表3 可控负荷参数

节点	最大可控负荷电力/MW	最低中断负荷报价/(元/MW)
3	100	60
4	100	40

设置可控负荷初始报价为其最低中断负荷报价,则基于本文所提出的优化方法,系统节点边际电价与可控负荷3和4的收益变化曲线如图4所示。

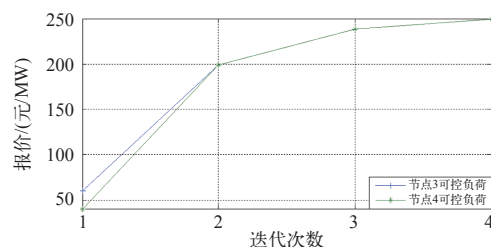


图4 送出阻塞区域报价变化

可以发现其报价最后收敛于250元/MW,但是其最大调用量一共仅有50 MW。

其原因在于提高调用量后,该区域节点边际电价上升,将导致其购电成本大幅增加。而如果采用传统的静态优化方法,在这种情况下,可控负荷不会参与阻塞管理响应。

4 结束语

可控负荷参与电力市场阻塞调控,丰富了电网调度运行中阻塞调控的措施和手段,同时也是负荷侧参与电网互动的有效机制。本文充分考虑可控负荷服务商参与阻塞调控的决策机制,基于两层规划模型提出了考虑可控负荷决策机制的输电网阻塞优化调控模型与求解方法。该方法有利于提升可控负荷服务商参与阻塞管理的整体收益,能够大大提升其参与积极性,更有利于电力市场环境下的负荷互动。

参考文献

- [1] 张永平, 焦连伟, 陈寿孙, 等. 电力市场阻塞管理综述 [J]. 电网技术, 2003, 27 (8): 1-9, 32.
- [2] 邵雪, 孙宏斌, 郭庆来. 能源互联网中基于区块链的电力交易和阻塞管理方法 [J]. 电网技术, 2016, 40 (12): 3630-3638.
- [3] 施泉生, 李士功. 可中断负荷参与阻塞管理模型与特性分析 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27 (7): 48-53.
- [4] 刘伟佳, 吴秋伟, 文福拴, 等. 电动汽车和可控负荷参与配电系统阻塞管理的市场机制 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38 (24): 26-33, 101.
- [5] 张森林, 王钦, 张尧, 等. 基于可中断负荷拍卖模型的电力双边交易阻塞管理 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39 (22): 122-128.
- [6] 董军, 张婧, 陈小良, 等. 考虑需求侧响应的短

期阻塞管理模型与激励机制研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38 (3): 24-28.

- [7] 邹晓松, 罗先觉. 基于奔德斯算法的静态安全稳定约束协调控制阻塞管理 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29 (25): 78-85.
- [8] 马进, 宋永华, 卢强, 等. 开放电力市场环境下的动态阻塞管理 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28 (10): 23-28, 48.
- [9] 潘敬东, 谢开. 节点边际电价的优化原理 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30 (22): 38-42, 95.
- [10] 李才华, 杜松怀, 苏娟, 等. PJM输电权运行机制及其在我国区域电力市场阻塞管理中的应用 [J]. 现代电力, 2007, 24 (3): 82-86.
- [11] 王雁凌, 邱小燕, 许传龙. 以节能降耗为目标的发电权交易阻塞管理模型 [J]. 电网技术, 2012, 36 (6): 272-276.

(收稿日期: 2017-10-12) **EA**

(上接第53页)

测距算法, 由于线路参数受天气、地理情况等多种因素影响而时刻变化, 导致测距误差。该算法有效地避免了此种情况, 只需要双端所测得的电气量建立测距方程即可完成测距, 根据大量仿真结果显示此算法不受过渡电阻、系统运行方式、故障类型及故障距离的影响, 在高阻接地时依然可以得到较精确的测距结果, 对于线路不太长的输电线路有着较好的测距效果。

综上所述, 本文提出的不受线路参数影响的双端故障测距算法, 可以适应测距要求, 满足工程需要, 具有较好的应用前景。

参考文献

- [1] Crossly P A, Mc Laren P G. Distance protection based on traveling wave [J]. IEEE Transactions on PAS, 1983 PAS-102 (9): 2971-2983.
- [2] 王安定, 葛耀中. 模量变换技术在反应故障分量的微机保护中的应用研究 [J]. 电力系统自动化, 1988, 12 (3): 17-27.
- [3] 施围. 电力系统过电压计算 [M]. 西安: 西安交

通大学出版社, 1988.

- [4] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1996.
- [5] 郭林勇, 何正友. 一种提取行波自然频率的单端故障测距方法 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28 (10): 69-74.
- [6] 宗剑, 牟龙华, 李晓波. 基于贝叶斯公式的配电网故障区段定位方法 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 19 (5): 45-48.
- [7] 郭壮志, 吴杰康. 配电网故障区间定位的仿电磁学算法 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30 (13): 34-40.
- [8] 宋国兵, 李森, 康小宁, 等. 一种新相模变换矩阵 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (14): 57-61.
- [9] 吴振升, 杨学昌, 曹振舫. 多支配电网接地故障定位的特征向量法 [J]. 电力系统自动化, 2003, 28 (16): 45-50.
- [10] 伊贵业, 杨学昌, 吴振升. 配电网接地故障定位的传递函数法 [J]. 清华大学学报, 2000, 40 (7): 31-34.

(收稿日期: 2017-01-12) **EA**