

基于目标级联分析法的输电网结构优化

张旋¹, 张玉敏¹, 吉兴全¹, 杨子震¹, 刘健¹, 杨建²

(1. 山东科技大学 电气与自动化工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 国网青岛供电公司, 山东 青岛 266002)

摘要:为了充分利用可再生能源,增强电力系统各区域间的互联协调能力,提出了一种基于目标级联分析(ATC)法的输电网结构优化模型。首先,利用母线撕裂法将电力系统解耦为多区域互联系统;其次,建立含可再生能源发电的输电网结构优化模型,在此基础上,进行多区域互联电力系统的统一分析和决策;再次,采用ATC法将模型分解为主问题和子问题进行并行计算,实现源网荷协同的输电网结构优化。最后,通过对IEEE 14节点及IEEE 118节点系统的测试分析,验证了所提模型可有效协调互联电网的运行,提高电力系统运行的经济性。

关键词:电力系统;多区域互联系统;输电网结构优化;目标级联分析法;可再生能源;源荷平衡

中图分类号:TM 72

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202208005

0 引言

在能源广域互联的背景下,电网互联有利于电能远距离传输,提高能源利用效率,进而为大容量、高效能机组的优化管理提供支持。然而,我国的能源与负荷呈逆向分布,源荷不平衡矛盾较为突出,而各类间歇性可再生能源发电占比日益增加,源网矛盾逐渐突出^[1],输电网运行过程中时常出现网络阻塞等问题^[2],使多区域互联电网间的调控能力面临严峻考验,因此增强电力系统区域间的互联和非同调效应具有重要意义。

输电网中的非同调现象,在不额外增加输电网建设投资的前提下,可以根据电网的实际工作条件,通过开断线路和电磁环网开环运行进行输电网结构优化,可在一定程度上消除网络阻塞,从而缓解了源、网、荷之间的冲突,提高了系统的灵活性和经济性。基于此,输电网结构优化(optimal transmission switching, OTS)成为一种通过改变电力系统中部分线路的开闭状态以改变潮流分布的有效方法^[3]。目前已有部分学者对输电网的结构优化进行了研究。文献[4]提出了考虑结构优化的含可再生能源的OTS模型,通过OTS降低了系统运行成本及故障后网络阻塞造成的损失成本。文献[5]结合可再生能源,构建了计及网络结构优化和储能配置的两阶段随机优化模型,提高了电力系统的经济性。文献[6]

提出了基于广义短路比灵敏度分析的OTS方法,其有助于协调系统强度与短路电流水平之间的矛盾。文献[7]在矩估计理论的基础上构建OTS模型,使得特高压接入下的电力系统安全性有所提高。由于考虑OTS的经济调度模型是典型的混合整数规划问题,模型中引入了大量的离散变量,使得模型求解难度增加,上述研究虽然验证了OTS能够有效提升系统的经济性与可靠性,但没有对提升模型的求解速度进行研究。

为此,诸多学者围绕模型的求解算法展开了深入研究。文献[8]通过使用交替方向乘法(alternating direction method of multipliers, ADMM)实现交流系统的分布式最优潮流(optimal power flow, OPF)计算。由于ADMM源自增广拉格朗日乘子法和邻近点算法,它并没有消除一阶算法固有的缺点^[9]。文献[10]采用分布式内点法对电网OPF进行分散式求解。为实现各个区域的同步迭代,文献[11]采用同步交替方向乘法解决多子系统的并行协调优化问题,进而确定整体最优解。上述优化算法能有效提升模型的求解速度,但未考虑到电网规模庞大、受分区管理、信息不共享等因素影响,难以建立起统一的互联电网模型。

目标级联分析(analytical target cascading, ATC)法可用于加速难以用集中方式解决大规模优化问题的处理过程,并用于管理具有多个独立控制实体的系统。文献[12]利用ATC法寻找日前调度的最优发电计划,在每次迭代中,只有边界母线的电压和相角需要在主问题和子问题之间共享。因此,每次迭代的数据交换量低且通信简单。文献[13]利用ATC法搭建了双层调度框架,提出了一种面向主动配电网和虚拟微电网的线性化交互式调度模型,解决了由于上下层之间存在交互变量而导致的耦合问题。

收稿日期:2021-08-08;修回日期:2022-05-21

在线出版日期:2022-08-05

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金资助项目(52107111);山东省自然科学基金青年资助项目(ZR2021QE117)

Project supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (52107111) and the Young Scientific Program of Shandong Provincial Natural Science Foundation(ZR2021QE117)

上述研究为本文开展输电网结构优化提供了良好的借鉴作用。

为提升互联电网整体运行水平和模型的计算效率,本文基于输电系统中的非同调现象,提出了一种基于ATC法的计及可再生能源的OTS模型。针对区域互联的输电网结构模型,通过母线撕裂法对互联电网进行切分,在切分后的各分区内进行独立的经济调度,利用ATC法进行解耦和求解,有效降低了求解难度。基于算例分析验证了所提模型和方法的有效性。

1 ATC法

ATC法首先将上层系统中的耦合变量传递给子系统,然后对各个子系统分别进行求解,从而获得全局最优解^[14]。ATC法与ADMM和辅助问题原理(auxiliary problem principle, APP)法类似^[15],APP、ADMM应用了对偶概念并引入了一组罚函数,然后将原优化问题分解成若干个子问题;ATC法将整个系统分解成若干个子系统,然后应用约束松弛的概念对各问题进行并行求解^[16]。本文选取区域间联络线交换功率和电压相角作为共享变量,通过设置目标变量和响应变量对相邻层间的共享变量进行建模,形成各独立区域相关的目标函数和约束条件,其中目标变量为上层(系统层)传送到下层(子系统层)的共享变量,响应变量为下层传送到上层的共享变量,具体如式(1)所示。

$$\left\{ \begin{array}{l} \min \left(\phi(\mathbf{x}_{\text{sys}}, \mathbf{R}_{\text{sys}}) + \sum_{i \in N} \left\| \mathbf{w}_i^r (\mathbf{R}_{\text{sub}, i}^{\text{sys}} - \mathbf{R}_{\text{sub}, i}^{\text{sub}}) \right\|_2^2 + \sum_{i \in N} \left\| \mathbf{w}_i^y (\mathbf{y}_{\text{sub}, i}^{\text{sys}} - \mathbf{y}_{\text{sub}, i}^{\text{sub}}) \right\|_2^2 \right) \\ \text{s.t.} \left\{ \begin{array}{l} \mathbf{R}_{\text{sys}} = \mathbf{R}_{\text{sys}}(\mathbf{x}_{\text{sys}}, \mathbf{R}_{\text{sub}}) \\ \mathbf{g}_{\text{sys}}(\mathbf{x}_{\text{sys}}, \mathbf{R}_{\text{sys}}) \leq 0 \\ \mathbf{h}_{\text{sys}}(\mathbf{x}_{\text{sys}}, \mathbf{R}_{\text{sys}}) = 0 \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (1)$$

式中: N 为下层系统区域的集合; \mathbf{x}_{sys} 为上层系统设计变量; \mathbf{R}_{sys} 为上层系统响应; $\phi(\cdot)$ 为系统目标和系统响应之间的偏差; $\|\cdot\|$ 为欧几里得范数,可以选择多种标准来计算目标和响应之间的差异; $\|\cdot\|_2^2$ 为采用2-范数计算偏差; $\mathbf{R}_{\text{sub}, i}^{\text{sys}}$ 为上层系统中子系统 i 的响应; $\mathbf{R}_{\text{sub}, i}^{\text{sub}}$ 为下层系统中子系统 i 的响应; $\mathbf{y}_{\text{sub}, i}^{\text{sys}}$ 为上层系统中子系统 i 的耦合变量; $\mathbf{y}_{\text{sub}, i}^{\text{sub}}$ 为下层系统中子系统 i 的耦合变量; $\mathbf{g}_{\text{sys}}(\cdot)$ 和 $\mathbf{h}_{\text{sys}}(\cdot)$ 分别为系统的不等式约束和等式约束集合; \mathbf{w}_i^r 和 \mathbf{w}_i^y 分别为子系统 i 的响应和耦合变量的正权重系数^[17]。

在式(1)所示的目标函数中,第2、3项是由子系统响应和耦合变量表示的偏差,子系统可表示为式(2)。

$$\left\{ \begin{array}{l} \min \left(\left\| \mathbf{w}_i^r (\mathbf{R}_{\text{sub}, i}^{\text{sys}} - \mathbf{R}_{\text{sub}, i}^{\text{sub}}) \right\|_2^2 + \left\| \mathbf{w}_i^y (\mathbf{y}_{\text{sub}, i}^{\text{sys}} - \mathbf{y}_{\text{sub}, i}^{\text{sub}}) \right\|_2^2 \right) \\ \text{s.t.} \left\{ \begin{array}{l} \mathbf{g}_{\text{sub}, i}(\mathbf{x}_{\text{sub}, i}, \mathbf{y}_{\text{sub}, i}^{\text{sub}}, \mathbf{R}_{\text{sub}, i}^{\text{sub}}) \leq 0 \\ \mathbf{h}_{\text{sub}, i}(\mathbf{x}_{\text{sub}, i}, \mathbf{y}_{\text{sub}, i}^{\text{sub}}, \mathbf{R}_{\text{sub}, i}^{\text{sub}}) = 0 \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (2)$$

式中: $\mathbf{g}_{\text{sub}, i}(\cdot)$ 和 $\mathbf{h}_{\text{sub}, i}(\cdot)$ 分别为子系统 i 的不等式约束和等式约束集合; $\mathbf{x}_{\text{sub}, i}$ 为子系统 i 的设计变量。

2 基于ATC法的输电网结构优化模型

考虑到可再生能源与电网结构优化的经济调度是一个复杂的非线性优化问题,基于母线撕裂法和ATC法构建OTS数学模型。为不失一般性,本文通过母线撕裂法将系统分成区域A—C这3个部分,分别建立相应的OTS模型。本节以区域A为例,构建基于ATC法的输电网多区域经济调度模型,同理可得区域B、C的数学模型。

2.1 目标函数

目标函数为系统常规机组的发电成本最小化,如式(3)所示。

$$\min \left(\sum_{g \in \Omega_G^A} C_g^A(P_g^A) + \sum_{g \in \Omega_G^B} C_g^B(P_g^B) + \sum_{g \in \Omega_G^C} C_g^C(P_g^C) \right) \quad (3)$$

式中: $C_g^A(\cdot)$ 、 $C_g^B(\cdot)$ 和 $C_g^C(\cdot)$ 分别区域A、B、C中机组 g 的发电成本函数; Ω_G^A 、 Ω_G^B 和 Ω_G^C 分别为区域A、B、C中的常规机组集合; P_g^A 、 P_g^B 和 P_g^C 分别为区域A、B、C中机组 g 的出力。

2.2 约束条件

1)发电机出力约束。

$$P_g^{\text{A}, \min} \leq P_g^A \leq P_g^{\text{A}, \max} \quad \forall g \in \Omega_G^A \quad (4)$$

式中: $P_g^{\text{A}, \max}$ 和 $P_g^{\text{A}, \min}$ 分别为区域A中机组 g 输出功率的上、下限。

2)爬坡约束。

$$R_g^{\text{dn}} \Delta t \leq P_{g, t+\Delta t}^A - P_{g, t}^A \leq R_g^{\text{up}} \Delta t \quad \forall g \in \Omega_G^A \quad (5)$$

式中: R_g^{up} 和 R_g^{dn} 分别为机组 g 的向上、向下爬坡速率; Δt 为机组爬坡允许时间。

3)支路功率约束。

$$b_l^A (\theta_i^A - \theta_j^A) - P_l^A + (1 - z_l^A) M_l^A \geq 0 \quad \forall l \in \Omega_L^A \quad (6)$$

$$b_l^A (\theta_i^A - \theta_j^A) - P_l^A - (1 - z_l^A) M_l^A \leq 0 \quad \forall l \in \Omega_L^A \quad (7)$$

$$-P_l^{\text{A}, \max} z_l^A \leq P_l^A \leq P_l^{\text{A}, \max} z_l^A \quad \forall l \in \Omega_L^A \quad (8)$$

式中: Ω_L^A 为区域A的支路集合; b_l^A 为区域A中支路 l 的电纳; θ_i^A 、 θ_j^A 分别为区域A中节点 i 、 j 的电压相角; z_l^A 为二进制变量,表示区域A中支路 l 的状态, $z_l^A=1$ 、 $z_l^A=0$ 分别表示支路运行、停运; P_l^A 为区域A中支路 l 的有功功率; M_l^A 为非常大的常数, $M_l^A \geq 2b_l^A \bar{\theta}_{ij}^A$; $P_l^{\text{A}, \max}$ 为区域A中支路 l 的传输容量上限。

4)电压相角约束。

$$\underline{\theta}_i^A \leq \theta_i^A \leq \bar{\theta}_i^A \quad (9)$$

式中: $\bar{\theta}_i^A$ 、 $\underline{\theta}_i^A$ 分别为节点 i 的电压相角的上、下限。

5)节点功率平衡约束。

$$\sum_{g \in \Omega_{G,i}^A} P_g^A + \sum_{w \in \Omega_{W,i}^A} P_w^A + \sum_{v \in \Omega_{V,i}^A} P_v^A - \sum_{d \in \Omega_{D,i}^A} P_d^A = \sum_{l \in \Omega_{L,i}^A} P_{l,ij}^A - \sum_{l \in \Omega_{L,i}^A} P_{l,ji}^A \quad (10)$$

式中： $\Omega_{G,i}^A$ 、 $\Omega_{W,i}^A$ 、 $\Omega_{V,i}^A$ 、 $\Omega_{D,i}^A$ 和 $\Omega_{L,i}^A$ 分别为区域A电网常规机组、风电、光伏、负荷和支路节点集合； P_w^A 、 P_v^A 分别为区域A风电场 w 的出力和光伏 v 发电出力值； P_d^A 为区域A中节点 d 的有功负荷； $P_{l,ij}^A$ 、 $P_{l,ji}^A$ 分别为支路 l 正、反方向的有功功率。

6) 区域耦合约束。

$$P_{ij}^A = P_{ij} \quad \forall B \in \Delta^A, \forall (i, j) \in \Gamma^{A,B} \quad (11)$$

$$\theta_{ij}^A = \theta_{ij} \quad \forall B \in \Delta^A, \forall (i, j) \in \Gamma^{A,B} \quad (12)$$

式中： Δ^A 为区域A的相邻区域集合； $\Gamma^{A,B}$ 为区域A和B的联络支路集合； $(i, j) \in \Gamma^{A,B}$ 表示区域A内节点 i 和区域B内节点 j 分别为联络支路的首、末节点； P_{ij} 和 θ_{ij} 分别为联络支路的功率和相角差。

7) 支路开断数量约束。

$$\sum_{l \in \Omega_l^A} (1 - z_l^A) \leq J^A \quad (13)$$

式中： J^A 为区域A中最大允许的线路开断数目。

8) 风电和光伏出力约束。

$$0 \leq P_v^A \leq P_v^{A, \max} \quad (14)$$

$$0 \leq P_w^A \leq P_w^{A, \max} \quad (15)$$

式中： $P_v^{A, \max}$ 为区域A中光伏 v 发电的最大出力； $P_w^{A, \max}$ 为区域A中风电场 w 的最大输出功率。

2.3 模型简化

以图1所示的上、下层系统结构为例,对本文所提模型进行分解。图中:上层系统为区域A,下层系统为区域B和区域C; t 为从上层系统发送到下层系统的共享变量组成的向量,将其作为目标向量; r 为下层系统向上层系统传输的共享变量组成的向量,将其作为响应变量。由图1(a)可见,为追求系统总运行成本的最小化,将上下层系统决策量进行迭代优化,上层系统向下分流,下层系统向上反馈,从

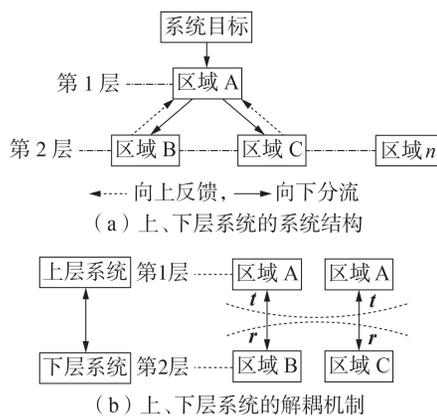


图1 上、下层系统的分解

Fig.1 Decomposition of upper- and lower-layer system

而实现互联电网的整体优化。为便于描述ATC算法的求解过程,本文给出模型的矩阵表达式为:

$$\min \left\{ F^A(\mathbf{x}, t_1, t_2, \dots, t_n) + \sum_{n \in N} F_n^B(\mathbf{y}, r_1, r_2, \dots, r_n, t'_1, t'_2, \dots, t'_n) \right\} \quad (16)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \mathbf{g}^A(\mathbf{x}, t_1, t_2, \dots, t_n) \leq 0 \\ \mathbf{h}^A(\mathbf{x}, t_1, t_2, \dots, t_n) = 0 \end{cases} \quad (17)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \mathbf{g}_n^B(\mathbf{y}, r_1, r_2, \dots, r_n, t'_1, t'_2, \dots, t'_n) \leq 0 \\ \mathbf{h}_n^B(\mathbf{y}, r_1, r_2, \dots, r_n, t'_1, t'_2, \dots, t'_n) = 0 \end{cases} \quad (18)$$

$$\mathbf{c} = \mathbf{t} - \mathbf{r} = 0 \quad (19)$$

式中： \mathbf{g}^A 、 \mathbf{h}^A 分别为上层系统中区域A需满足的不等式和等式约束； \mathbf{x} 为上层系统中除联络支路以外的决策变量， t_1, t_2, \dots, t_n 为上层系统的区域变量； \mathbf{g}_n^B 、 \mathbf{h}_n^B 分别为第 n 个下层系统(例如图1(a)区域B)的不等式、等式约束条件； \mathbf{y} 为第 n 个下层系统的变量需满足的本地约束， $r_1, r_2, \dots, r_n, t'_1, t'_2, \dots, t'_n$ 为第 n 个下层系统区域变量； \mathbf{c} 表示上层系统区域变量与第 n 个下层系统区域变量的耦合约束。

3 模型转化与求解

3.1 模型解耦

为便于形成各区域相关的目标函数及约束条件,设置2组变量集合。根据ATC解算思想,将约束式(19)分别在上层和下层系统的模型中进行求解。这里利用罚函数 ζ 来松弛耦合约束,如式(20)所示。

$$\zeta(\mathbf{c}) = \lambda \odot (\mathbf{t} - \mathbf{r}) + \|\mu \odot (\mathbf{t} - \mathbf{r})\|_2^2 \quad (20)$$

式中： \odot 表示Hadamard积； λ 和 μ 分别为罚函数 ζ 的一次项和二次项的乘子向量。

上下层系统的优化模型可表示为:

$$\begin{cases} \min F^A(\mathbf{x}, t_1, t_2, \dots, t_n) + \sum_{n \in N} \zeta(\mathbf{c}) \\ \text{s.t.} \begin{cases} \mathbf{g}^A(\mathbf{x}, t_1, t_2, \dots, t_n) \leq 0 \\ \mathbf{h}^A(\mathbf{x}, t_1, t_2, \dots, t_n) = 0 \end{cases} \end{cases} \quad (21)$$

$$\begin{cases} \min F_n^B(\mathbf{y}, r_1, r_2, \dots, r_n, t'_1, t'_2, \dots, t'_n) + \sum_{n \in N} \zeta(\mathbf{c}) \\ \text{s.t.} \begin{cases} \mathbf{g}_n^B(\mathbf{y}, r_1, r_2, \dots, r_n, t'_1, t'_2, \dots, t'_n) \leq 0 \\ \mathbf{h}_n^B(\mathbf{y}, r_1, r_2, \dots, r_n, t'_1, t'_2, \dots, t'_n) = 0 \end{cases} \end{cases} \quad (22)$$

通过式(20)将上、下层系统间的耦合约束进行松弛处理后,上层系统和下层系统只剩下区域变量中需要满足的本地约束和本地决策变量,由此上、下两层系统实现了解耦。

3.2 解耦的上层系统与下层系统优化模型

在基于ATC法的互联电网结构优化调度中,上层系统的目标函数为:

$$F^A + \sum_{n \in N} \lambda_n \odot (\mathbf{t}_n - \mathbf{r}_n^*) + \sum_{n \in N} \|\mu_n \odot (\mathbf{t}_n - \mathbf{r}_n^*)\|_2^2 \quad (23)$$

式中: λ_n 、 μ_n 分别为拉格朗日一次项、二次项的乘子,通过不断更新拉格朗日乘子使目标函数满足收敛条件,以至趋于最优; r_n^* 为 r_n 优化后的新变量。

上层的区域 A 在求解自身模型时,将虚拟负荷 t_n 优化后的值 t_n^* 以参数的形式传递给下层系统。上层系统在更新时,需要将虚拟负荷联动优化,并对每个区域的虚拟发电机进行优化。

由式(20)可见,与上层系统相同,在下层系统进行独立优化时,需要将虚拟发电机 r_n 和虚拟负荷 t_n 结合进行优化,通过引入罚函数对耦合约束进行松弛,并加入到下层系统的目标函数中。以区域 B 为例,下层系统的目标函数表示为:

$$F_n^B + \sum_{n \in N} \lambda_n \odot (t_n^* - r_n) + \sum_{n \in N} \mu_n \odot (t_n^* - r_n) \Big|_2^2 \quad (24)$$

通过不断更新乘子使目标函数满足收敛条件,以趋于最优,从而上、下层系统可独立进行更新、求解。

3.3 收敛判据与乘子更新原则

优化调度算法的收敛判据为:

$$|t_{nk} - r_{nk}| \leq \varepsilon_1 \quad (25)$$

$$\left| \frac{F_k^A + \sum_{n \in N} F_{nk}^B - \left(F_{k-1}^A + \sum_{n \in N} F_{n(k-1)}^B \right)}{F_k^A + \sum_{n \in N} F_{nk}^B} \right| \leq \varepsilon_2 \quad (26)$$

式(25)表示在第 k 次迭代中,下层系统虚拟发电机 r_{nk} 与上层系统虚拟负荷 t_{nk} 作为耦合变量,其差值需要满足所要求的精度 ε_1 ;式(26)表示分解后的上层系统和下层系统的总体效益在相邻 2 次迭代中需要满足精度 ε_2 。若不能同时满足式(25)和式(26),则依据式(27)更新乘子。

$$\begin{cases} \lambda_{nk} = \lambda_{n(k-1)} + 2\mu_{n(k-1)} \odot \mu_{n(k-1)} \odot (t_{n(k-1)} - r_{n(k-1)}) \\ \mu_{nk}^2 = \beta \mu_{n(k-1)} \end{cases} \quad (27)$$

式中: β 的作用是为了加快收敛速度,一般取值为 $2 \leq \beta \leq 3$; λ 和 μ 的初值一般选取较小的常数,本文取值为 $\lambda = \mu = 1$ 。

3.4 基于 ATC 法的 OTS 优化求解流程

基于 ATC 法的 OTS 优化求解流程如附录 A 图 A1 所示,具体步骤如下。

1) 设定 ATC 法的最大迭代次数为 k' ,并置当前迭代次数 $k=1$,输入常规机组参数,设置各个优化变量以及罚函数乘子等初值。

2) 求解下层系统。根据下层系统模型,即式(24)和式(18)对每个区域进行并行优化,并将求解得到的功率传递给上层系统。

3) 求解上层系统。根据上层系统模型,即式(23)和式(17)进行优化,并将求解得到的功率,传递给下层系统。

4) 判断是否同时满足式(25)和式(26),若同时

满足,则终止迭代过程并输出最优调度结果,否则根据式(27)更新乘子,置迭代次数 $k=k+1$ 并返回步骤 2)。如果 $k > k'$,则说明算法不收敛,终止计算。

4 算例分析

选择改进的 IEEE 14 节点系统及 IEEE 118 节点测试系统对模型进行仿真分析。计算机配置为 intel i7-6300 处理器、8 GB 内存,采用 GAMS 软件进行编程,并选用 CPLEX 工具对模型进行求解。

4.1 IEEE 14 节点系统

IEEE 14 节点系统包含 5 台发电机、20 条线路,机组和线路参数见附录 A 表 A1—A3,风电场参数和光伏发电参数分别见附录 A 表 A4 和表 A5。考虑到光伏与风力发电具有较大的间歇性与随机性,故选取其出力上、下限中的随机变量进行测试。通过母线撕裂法将该系统分解成三区域系统,如图 2 所示。设置区域 A 和区域 B 的开断输电线路数为 1。

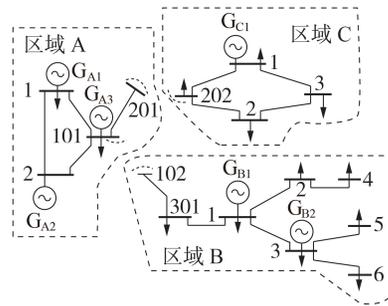


图 2 三区域互联系统

Fig.2 Three regional interconnection system

4.1.1 ATC 法有效性分析

为了验证所采用 ATC 法的求解优势,将 ATC、APP 法所得结果进行对比,如表 1 与图 3 所示。

表 1 不同算法的求解结果

方法	运行成本 / \$	迭代次数	迭代时间 / s
ATC	18 394.46	34	7.71
APP	18 212.23	43	8.97

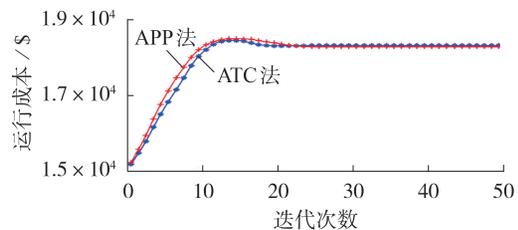


图 3 算法结果对比

Fig.3 Comparison of algorithm results

由表 1 和图 3 可知:在运行成本方面,采用 APP 法求解的运行成本为 \$ 18 212.23,而 ATC 法求得的运行成本为 \$ 18 394.46,由于初始参数的设置与网

络拓扑的改变,使得ATC法的运行成本略高于APP法;在收敛性能上,ATC法的迭代次数和迭代时间分别为34次和7.71 s,APP法在迭代次数和收敛时间上的表现劣于ATC法,说明了本文所采用的ATC法收敛性能较好。APP法的收敛性能取决于其参数和电网分区,由于OTS问题的复杂性,很难得到充分而有效的解;而ATC法可扩展性强,对系统的OTS优化问题具有较好的适用性。

4.1.2 输电网络结构优化及可再生能源接入影响分析

为了证明OTS的效果和可再生能源发电对系统运行的影响,设置如下4种方案并进行对比分析:方案1,不考虑OTS及可再生能源发电;方案2,不考虑OTS,考虑可再生能源发电;方案3,考虑OTS,不考虑可再生能源发电;方案4,同时考虑OTS及可再生能源发电。

1) 不考虑输电网络结构优化的影响分析。

当不考虑OTS时,为了验证可再生能源接入对输电网络运行的影响,对比分析了方案1、2下各区域运行成本和机组出力,结果如表2所示。

表2 方案1和方案2的运行结果对比

Table 2 Operating result comparison between Scheme 1 and Scheme 2

区域	机组	方案1		方案2	
		成本/\$	机组出力/MW	成本/\$	机组出力/MW
A	G _{A1}		86.01		118.65
	G _{A2}	8476.62	79.34	6783.88	33.44
	G _{A3}		85.00		85.00
B	G _{B1}	7363.38	63.00	7261.27	63.00
	G _{B2}		185.00		185.00
C	G _{C1}	4363.69	126.41	4369.31	129.96

由表2分析可知:在方案2中,由于考虑了可再生能源发电的接入,极大地释放了机组G_{A1}的发电能力,使得经济性较好的机组G_{A1}出力增加,经济性最差的机组G_{A2}出力减少;采用方案1时,各区域成本分别为\$8476.62、\$7363.38及\$4363.69,而采用方案2时,各区域运行成本与采用方案1时相比分别降低了19.97%、1.39%和-0.13%,其中区域A成本降低幅度较大,而区域B、C的成本变化幅度较小,这说明下层区域B、C能够凭借自身的发电资源实现分布自治,从而极大地减少了上层区域A的功率救济,使得区域A的经济性得到明显提高。

2) 输电网络结构优化影响分析。

为了证明可再生能源接入时考虑OTS的效果,方案2和方案4的机组出力和运行成本如表3所示,输电线路运行情况如表4所示。

由表3分析可知:与不考虑OTS的方案2相比,采用方案4时,机组G_{A1}出力增加了43.27%,经济性最差的机组G_{A2}出力减少了35.27%,这说明考虑OTS可实现源出力模式与网架结构的配合,使得发

表3 方案2和方案4的运行结果对比

Table 3 Operating result comparison between Scheme 2 and Scheme 4

区域	机组	方案2		方案4	
		成本/\$	机组出力/MW	成本/\$	机组出力/MW
A	G _{A1}		118.65		169.99
	G _{A2}	6783.88	33.44	5814.34	21.64
	G _{A3}		85.00		85.00
B	G _{B1}	7261.27	63.00	6086.17	69.00
	G _{B2}		185.00		166.00
C	G _{C1}	4369.31	129.96	4261.58	121.00

表4 考虑OTS的输电线路运行情况

Table 4 Transmission line operation condition considering OTS

区域	输电线路	传输功率/MW		
		方案2	方案3	方案4
A	1-2	67.34	58.88	89.49
	1-101	41.65	34.90	0
	2-101	3.35	0	28.59
	101-201	56.72	61.65	56.38
B	1-2	84.00	77.00	77.00
	1-3	-150.00	-110.00	-110.00
	2-4	60.00	54.00	54.00
	3-5	70.00	70.00	70.00
	3-6	60.00	54.00	54.00
	301-1	-86.00	-91.00	-91.00
C	102-301	-40.66	-47.33	-43.63
	1-3	90.00	68.77	93.89
	2-3	-50.00	-57.58	-59.15
	202-1	-26.41	-31.14	-32.40
	202-2	0	0	0

电资源合理分配;在经济性上,采用方案4时,各区域运行成本分别为\$5814.34、\$6086.17和\$4261.58,与采用方案2时相比分别下降了14.29%、16.18%和2.47%,由此说明将电网结构视为“动态可变”的经济调度方式能够达到缓解网络阻塞的目的,提升了系统的运行经济性。

由表4分析可知:当考虑OTS时,系统可通过负荷模式对输电线路状态进行优化调节,调节过程中区域A内支路1-101处于停运状态,从而降低了传输阻塞程度,输电线路1-2的传输功率得以大幅度增加,进一步表明了风、光的接入及开断输电线路的措施同时应用于电网调度中,可有效提升系统运行的经济性,更大程度地实现源网协同调度;方案3和方案4的开断线路分别为2-101、202-2和1-101、202-2,这说明在考虑OTS后,输电线路的运行状态可以依据相应负荷模式进行适当调整,可有效提高电网运行的灵活性。

4.2 IEEE 118节点系统

IEEE 118节点测试系统结构图如附录B图B1所示,系统发电机组特性数据、输电线路数据以及系统负荷数据见文献[18]。

4.2.1 算法性能对比

为证明 ATC 法在大规模系统中的适用性,在 IEEE 118 节点测试系统中比较了 ATC 法和 APP 法,结果如图 4 所示。

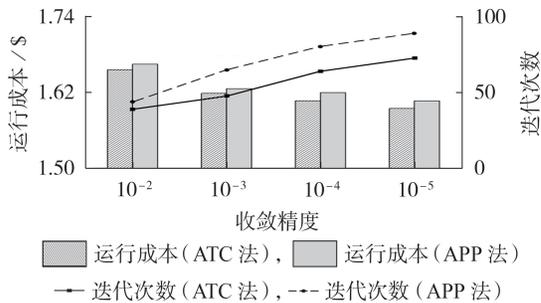


图4 不同收敛精度的算法优化结果

Fig.4 Optimization results of algorithms with different convergence accuracy

由图 4 可知:随着收敛精度的提高,ATC 法趋于最优的速度最快,展现了良好的收敛性能;收敛精度的提高导致迭代次数也随之增加;相比于 APP 法,在任一精度要求下,ATC 法始终保持良好的收敛性能和优化结果,这说明 ATC 法对于大规模系统仍具有较好的适用性。

4.2.2 优化结果对比

针对 IEEE 118 节点系统,分别采用上述 4 种方案对模型进行测试分析,所得的结果如表 5 所示,具体分析如下。

方案 4 的总成本相较于方案 1—3 分别下降了 18.99%、17.65%、2.50%;三区域运行成本分别为 \$47 311.34、\$63 384.13、\$52 117.87,与方案 1—3 相比都有不同程度的降低。这说明在保证系统安全运行的前提下,通过电网结构调度,提升了可再生能源的接纳水平,使系统运行的经济性得以提高。方案 4 中区域 A 与区域 B 的运行成本较方案 1—3 的下降程度高于区域 C,这是由于区域 A、B 阻塞较严重,故节省成本占比较为明显。综上所述,将风电、光伏系统及开断输电线路同时应用于电网中,实现系统区域间的协同合作,能够降低发电成本,提高能源利用效率,从而提升系统整体运行的灵活性和经济性。

表 5 4 种方案的运行成本对比

Table 5 Comparison of operating costs of four cases

方案	运行成本 / \$			总成本 / \$
	区域 A	区域 B	区域 C	
1	64 348.42	77 384.13	59 244.67	200 977.22
2	61 694.56	76 478.54	58 536.23	197 709.33
3	48 324.48	66 536.32	52 135.30	166 996.10
4	47 311.34	63 384.13	52 117.87	162 813.34

5 结论

本文对多区域电力系统调度优化问题进行研

究,提出了一种基于 ATC 法的输电网结构优化模型。算例分析所得结论如下。

1)所提模型能够有效提高互联电网整体运行的经济性,使电网灵活运行的能力得以充分发挥,高效利用全网资源,实现互联电网整体的统一优化。

2)所提模型增加了表示输电线路是否运行的离散变量,使其能够合理决策出系统所需的输电网架构。将电网结构优化、可再生能源与 ATC 相结合,极大地释放了网架结构的传输能力,提高了模型和方法的通用性。

3)本文所采用的 ATC 法收敛速度快,应用于多区域电网分布式求解时具有明显的效率优势,对较大规模的系统也具有较好的适应性。

后续研究可考虑如何提高模型的计算效率与计算精度。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 周景,张衡,刘盾盾,等. 考虑连锁故障的输电网扩展规划方法[J]. 电力自动化设备,2021,41(12):136-142.
ZHOU Jing,ZHANG Heng,LIU Dundun,et al. Expansion planning method of transmission network considering cascading failures[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(12):136-142.
- [2] OSTROWSKI J,WANG J H,LIU C. Transmission switching with connectivity-ensuring constraints[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(6):2621-2627.
- [3] 张衡,程浩忠,曾平良,等. 考虑 N-1 安全网络约束的输电网结构优化[J]. 电力自动化设备,2018,38(2):123-129.
ZHANG Heng,CHENG Haozhong,ZENG Pingliang, et al. Optimal transmission switching considering N-1 security network constraints[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(2):123-129.
- [4] 张天宇,宣文博,李慧,等. 综合考虑输电结构优化的含可再生能源电网规划方法[J]. 电力系统及其自动化学报,2021,33(5):113-120.
ZHANG Tianyu,XUAN Wenbo,LI Hui, et al. Planning method for power system with renewable energy considering optimal transmission switching[J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2021, 33(5):113-120.
- [5] 冯智慧,吕林,许立雄. 基于能量枢纽的沼-风-光全可再生能源系统日前-实时两阶段优化调度模型[J]. 电网技术,2019,43(9):3101-3109.
FENG Zhihui,LÜ Lin,XU Lixiong. Two-stage optimal dispatch model of day-ahead and real-time for biogas-wind-solar fully renewable energy system based on energy hub[J]. Power System Technology, 2019, 43(9):3101-3109.
- [6] 汪家铭,张静,杨建华,等. 基于广义短路比的多馈入直流系统受端电网结构优化方法[J]. 电力系统自动化,2020,44(24):111-118.
WANG Jiaming,ZHANG Jing,YANG Jianhua, et al. Optimization method of receiving-end AC grid structure for multi-infeed DC system based on generalized short-circuit ratio[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(24):111-118.
- [7] 刘万福,楚天舒,赵树野,等. 特高压接入下电网网架结构的多目标规划[J]. 电力系统及其自动化学报,2021,33(7):101-105.
LIU Wanfu,CHU Tianshu,ZHAO Shuye, et al. Multi-objective

- planning for grid structure under UHV access [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(7):101-105.
- [8] ERSEGHE T. Distributed optimal power flow using ADMM [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(5):2370-2380.
- [9] 程颖, 刘明波, 陈鸿琳, 等. 交流潮流约束机组组合的交替方向乘子法[J]. 电网技术, 2019, 43(1):143-148.
CHENG Ying, LIU Mingbo, CHEN Honglin, et al. Alternating direction multiplier method for AC power flow constrained unit commitment[J]. Power System Technology, 2019, 43(1):143-148.
- [10] 陆文甜, 刘明波, 林舜江, 等. 基于分布式内点法的多区域互联电力系统最优潮流分散式求解[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(24):6828-6837.
LU Wentian, LIU Mingbo, LIN Shunjiang, et al. Decentralized solution for optimal power flow of multi-area interconnected power systems based on distributed interior point method[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(24):6828-6837.
- [11] 梁梓均, 林舜江, 刘明波. 一种求解交直流互联电网分布式最优潮流的同步ADMM方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(23):28-36.
LIANG Zijun, LIN Shunjiang, LIU Mingbo. A synchronous ADMM algorithm for solving distributed optimal power flow of AC/DC interconnected power grid[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(23):28-36.
- [12] 黄瀚燕, 周明, 李庚银. 考虑多重不确定性和备用互济的含风电互联电力系统分散协调调度方法[J]. 电网技术, 2019, 43(2):381-389.
HUANG Hanyan, ZHOU Ming, LI Gengyin. Coordinated decentralized dispatch of wind-power-integrated multi-area interconnected power systems considering multiple uncertainties and mutual reserve support[J]. Power System Technology, 2019, 43(2):381-389.
- [13] DU Puliang, CHEN Zhong, CHEN Yanxi, et al. A bi-level linearized dispatching model of active distribution network with multi-stakeholder participation based on analytical target cascading[J]. IEEE Access, 2019, 7:154844-154858.
- [14] 杨伟峰, 文云峰, 李立, 等. 考虑疲劳载荷的风电场分散式频率响应策略[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(4):55-62.
YANG Weifeng, WEN Yunfeng, LI Li, et al. Decentralized frequency response strategy for wind farm considering fatigue load[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(4):55-62.
- [15] 姚璐, 赵维兴, 李舒佳, 等. 基于目标级联分析法的分布式主体可交易能源模型[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(9):256-264.
YAO Lu, ZHAO Weixing, LI Shujia, et al. Transactive energy model of distributed agents based on analytical target cascading[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9):256-264.
- [16] KARGARIAN A, MEHRTASH M, FALAHATI B. Decentralized implementation of unit commitment with analytical target cascading: a parallel approach[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(4):3981-3993.
- [17] 谢敏, 胡昕彤, 刘明波. 目标级联分析法在完全竞争发电市场迭代竞价机制中的应用[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(6):106-112.
XIE Min, HU Xintong, LIU Mingbo. Application of analytical target cascading in iterative bidding mechanism of complete competitive power generation market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(6):106-112.
- [18] JI Xingquan, ZHANG Yumin, HAN Xueshan, et al. Multi-level interactive unit commitment of regional power system[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 125:106464.

作者简介:



张旋

张旋(1995—),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统运行与控制(E-mail: xuanzhang@sdust.edu.cn);

张玉敏(1986—),女,讲师,博士,主要研究方向为电力系统运行与控制、综合能源系统优化(E-mail: yuminzhang@mail.sdu.edu.cn);

吉兴全(1970—),男,教授,博士生导师,博士,通信作者,主要研究方向为配电网优化(E-mail: xqji@sdust.edu.cn)。

(编辑 任思思)

Optimal transmission switching based on analytical target cascading method

ZHANG Xuan¹, ZHANG Yumin¹, JI Xingquan¹, YANG Zizhen¹, LIU Jian¹, YANG Jian²

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. State Grid Qingdao Electric Power Supply Company, Qingdao 266002, China)

Abstract: To make full use of renewable energy and enhance the interconnection and coordination among different regions of power system, an optimal transmission switching model based on analytical target cascading(ATC) method is proposed. Firstly, the power system is decoupled into a multi-area interconnected system by using the bus tearing method. Secondly, an optimal transmission switching for transmission with renewable power sources is established, based on which the unified analysis and decision-making of multi-area interconnected power system are carried out. Thirdly, ATC method is used to decompose the model into main problem and subproblem for parallel calculation to realize the optimal transmission switching with the source-network-load coordination. Finally, through the test and analysis of IEEE 14-bus and IEEE 118-bus systems, it is verified that the proposed method can effectively coordinate the operation of interconnected power grid, and improve the economy of power system operation.

Key words: electric power systems; multi-area interconnection system; optimal transmission switching; analytical target cascading method; renewable energy; source-load balance

附录 A

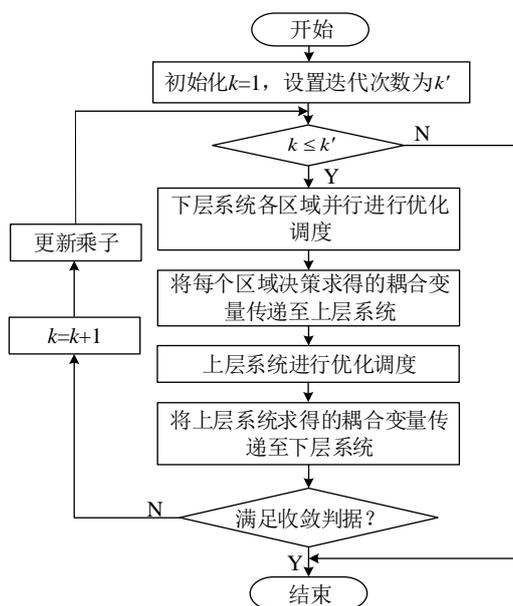


图 A1 基于 ATC 法的输电网结构优化求解流程

Fig.A1 Optimization solution flow of OTS based on ATC method

表 A1 IEEE 14 节点机组发电参数

Table A1 IEEE 14-bus generator parameters

机组	出力上限/MW	出力下限/MW	机组成本系数/(\$/MWh)
GA1	285	0	1.06
GA2	90	0	5.25
GA3	85	0	3.12
GB1	150	0	1.724
GB2	285	0	2.011
GC1	200	0	3.561

表 A2 IEEE 14 节点线路参数

Table A2 IEEE 14-bus line parameters

子区域	输电线	电抗/p.u.	传输容量/MW	子区域	输电线	电抗/p.u.	传输容量/MW
B	1-2	0.1739	150	A	1-2	0.0592	80
	1-3	0.171	200		1-101	0.223	70
	2-4	0.0421	150		2-101	0.198	80
	3-5	0.2091	70	101-201	0.1763	150	
	3-6	0.5562	150	C	1-3	0.1558	150
	301-1	0.252	150		2-3	0.1303	60
	102-301	0.1989	150		202-1	0.1762	60
-	-	-	202-2		0.11	150	

电力自动化设备

表 A3 IEEE 14 节点负荷参数
Table A3 IEEE 14-bus load parameters

子区域	节点编号	负荷/MW	子区域	节点编号	负荷/MW
B	1	80	A	1	150
	2	24		2	60
	3	24		101	70
	4	60		201	60
	5	30	C	1	30
	6	30		2	50
	102	50		3	40
	301	50		202	60

表 A4 风电场参数
Table A4 Parameters of wind field

节点编号	区域 A (节点 2)	区域 B (节点 2)	区域 C (节点 2)
功率上限	60MW	50MW	60MW
功率下限	0	0	0

表 A5 光伏发电参数
Table A5 Parameters of photovoltaic power generation

节点编号	区域 A (节点 1)	区域 B (节点 4)	区域 C (节点 3)
功率上限	60MW	50MW	60MW
功率下限	0	0	0

附录 B

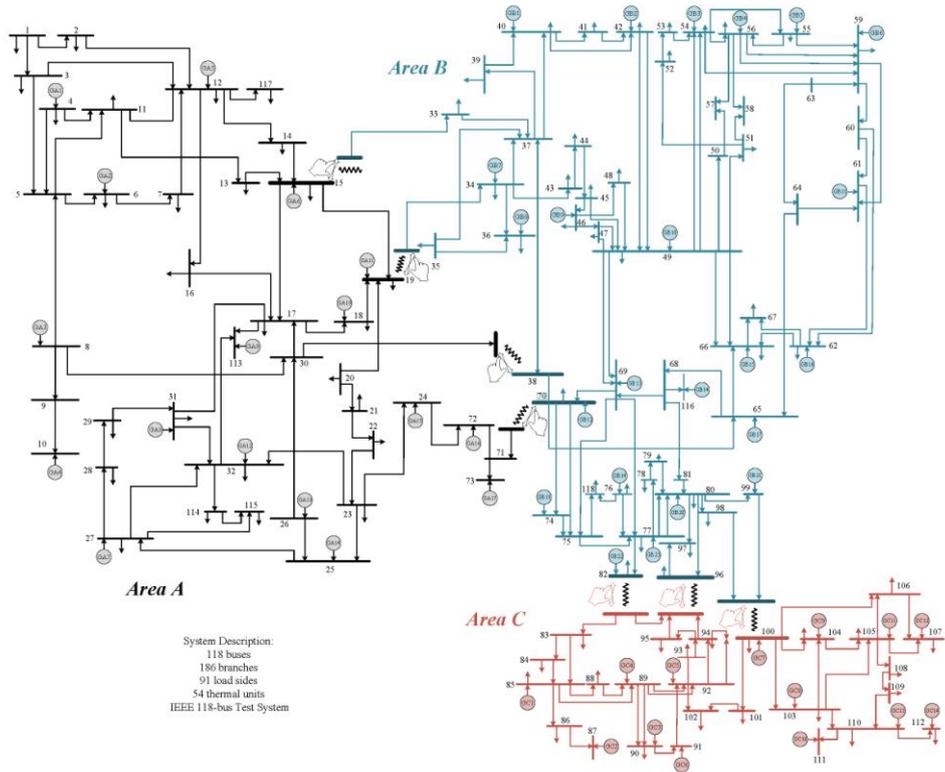


图 B1 IEEE 118 节点系统结构图
Fig.B1 Structure diagram of IEEE 118-bus system