

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.221934

考虑新能源极限并网强度约束的常规机组 最小开机方式优化方法

秦建茹¹, 李海波¹, 孙谊嫔², 王衡²

(1. 清华四川能源互联网研究院, 四川 成都 610213; 2. 国网新疆电力有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830046)

摘要: 新能源集群并网系统中需保证一定数量的常规电源提供短路容量以支撑系统电压, 而开机容量过大导致新能源可消纳空间减少, 故合理优化常规机组开机方式对于兼顾新能源消纳与电网强度至关重要。针对该问题, 基于短路比指标计算方法, 以临界短路比指标约束建立了常规机组开机方式与新能源并网系统强度之间的耦合模型; 然后在满足新能源设备极限并网强度要求的前提下, 提出以新能源最大化消纳为目标的机组最小开机方式优化模型, 并采用遗传算法和 CPLEX 求解器相结合的混合策略进行求解。最后以我国三北地区某新能源汇集送端系统工程为例, 验证了所提方法的有效性及其优越性。

关键词: 电网强度约束; 短路容量; 机组组合; 新能源消纳

Optimal method of minimum start-up mode for conventional units considering new energy limit grid-connection strength constraint

QIN Jianru¹, LI Haibo¹, SUN Yiqian², WANG Heng²

(1. Sichuan Energy Internet Research Institute-Tsinghua University, Chengdu 610213, China;
2. State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830046, China)

Abstract: A new energy cluster grid connection system has to encompass a certain number of conventional power sources that provide adequate short-circuit capacity to support the system voltage. However, excessive start-up capacity will reduce the new energy consumption space, so rationally optimizing the start-up mode of conventional unit is crucial to maintaining balance between new energy consumption and grid strength. To solve this problem, based on the short-circuit ratio index calculation method, a critical short-circuit ratio index constraint is used to build the coupling model between the start-up mode of a conventional unit and the strength of the new energy grid connection system. Then given that the ultimate grid connection strength requirements of new energy based equipment are satisfied, the optimization model for minimum start-up mode of a unit is devised to maximize the consumption of new energy, and the hybrid strategy of combining a genetic algorithm and CPLEX solver is used for the solution. Lastly, a new energy collection and transmission terminal system project in three northern regions of China is used as an example to demonstrate the effectiveness and superiority of the method.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2019YFE0111500).

Key words: power grid strength constraints; short circuit capability; unit commitment; new energy accommodation

0 引言

“双碳”背景下, 以风电、光伏为代表的清洁

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2019YFE0111500);
四川省重点研发项目资助(22SYSX0102); 中国电机工程学会
青年人才托举工程项目资助(JLB-2022-97)

能源呈现爆发式增长的趋势, 推动了新型电力系统的发展。然而, 风电、光伏出力所呈现的不确定性和间歇性都不利于电网的稳定运行^[1]; 且大规模新能源接入电网挤占了常规机组的可用空间, 导致系统惯量和电压支撑能力不足, 电网强度弱; 尤其是新能源集群接入的送端电网系统强度极其薄弱, 系统暂态电压失稳和宽频振荡^[2]等稳定问题突出, 常

见的交流故障与直流换相失败等扰动极易引发连锁性故障^[3], 严重制约了新能源消纳和送出能力。

目前, 针对大规模新能源集群接入弱电网系统稳定性问题已有大量研究, 主要聚焦于电网强度量化评估方面。大量学者提出了短路比和阻抗比指标以衡量系统电压支撑强度^[4-6]。短路比最早应用于传统直流系统中受端交流电网的强度分析, 而随着新能源设备的增多, 也对集群接入下电网的强弱评估提出了需求。文献[7]针对单馈入系统提出了传统的短路比指标, 但没有考虑多新能源场站之间的交互影响, 准确性较低。文献[8-9]简单计及各馈入支路的交互影响, 分别提出了加权短路比和复合短路比, 准确性仍然较低。文献[10-11]基于模态法对新能源多馈入系统进行解耦, 提出广义短路比, 但其工程实用性低。文献[12]提出一种计及新能源无功出力 and 场站交互影响因子的改进等效短路比指标, 可用于评估各新能源并网点系统强弱, 识别电网中的薄弱环节; 文献[13]在最大传输功率理论的基础上提出临界短路比概念, 并将临界短路比极值 2 作为划分系统强弱的标准。

同步发电机作为新能源并网系统中的惯量、阻尼提供者, 可提供电压、频率支撑, 提高弱电网系统强度^[14], 而常规机组开机容量过大将挤占新能源消纳空间, 故大量学者也开展了针对机组组合和运行方式的优化研究。文献[15-17]分析了常规电源不同开机方式对系统调峰能力的影响, 提出了满足系统调峰约束的机组最小开机方式优化方法; 文献[18]针对受端电网强馈入弱开机方式的典型场景, 提出了满足系统电压稳定约束的机组最小开机方式优化方法; 文献[19]不再只考虑单一因素对机组开机的影响, 而是综合分析了机组最小开机受限的多种因素, 提出了满足系统整体稳定水平的机组最小开机方式优化方法; 文献[20]提出一种考虑惯量支撑及频率调节全过程的分布鲁棒机组组合; 文献[21]基于导纳矩阵计算得到各节点短路电流权重指数, 以量化评估不同位置机组对直流送端的短路容量贡献度, 提出了考虑直流近区短路容量约束的机组组合优化模型。综上, 目前常规电源开机方式优化方面主要从调峰、调频以及电压约束等方面着手, 大多聚焦于多决策变量、多约束以及多目标的机组组合优化算法; 而考虑新能源极限并网强度约束的常规机组最小开机方式优化模型的研究较少。同步发电机对新能源场站电网强度提升的本质是可提高系统短路容量, 在新能源运行方式和电网结构一定的情况下, 对新能源场站电网强度的要求可以转换为对短路容量的要求, 进而可转化为对常规机组开

机方式的要求, 即新能源场站电网强度约束问题可以转化为系统内常规机组开机方式优化问题。

基于以上考虑, 本文在短路比指标计算方法的基础上, 以临界短路比指标约束建立了常规机组开机方式与新能源并网系统强度之间的耦合关系; 然后在满足新能源设备极限并网强度要求的前提下, 提出以新能源最大化消纳为目标的机组最小开机方式优化模型, 并采用遗传算法和 CPLEX 求解器相结合的混合策略进行求解。最后, 结合我国三北地区某新能源汇集送端系统工程, 开展了考虑新能源设备极限并网强度约束下的常规机组开机方式应用研究。

1 常规电源开机方式与电网强度关系研究

1.1 电网强度概念及量化指标

1) 电压支撑强度定义

传统电力电子设备以跟网型电流源形式接入系统, 缺乏惯性和阻尼支撑, 且无法主动响应电网电压、频率变化, 因此传统交流系统需要为其接入提供电压、频率支撑的设备, 整个系统稳定性主要取决于交流系统相对于电力电子设备的强弱程度。目前, 大规模新能源以电力电子逆变器形式接入电网, 大量学者对新能源并网系统的强弱评估问题进行了探讨, 提出频率支撑强度和电压支撑强度概念来表征新能源并网系统强度^[22-23]。其中, 频率支撑强度体现了系统扰动引发的频率变化阻碍作用, 通常采用惯性常数、频率变化率等指标衡量^[24]。电压支撑强度体现了在给定的初始运行状态下, 系统遭受扰动后维持电压稳定的能力^[23], 通常采用短路比、阻抗比等指标衡量。

电力系统强弱程度与频率支撑强度、电压支撑强度之间均呈正相关性, 随着新能源渗透率提高与多直流系统接入, 电力系统中的电力电子渗透率提高, 传统同步发电机逐步退出, 系统阻抗增大, 电力系统频率、电压支撑能力减弱。大规模新能源并网系统的抗扰动能力降低, 难以维持系统稳定运行。但在极高比例电力电子的电力系统中, 电压支撑强度和频率支撑强度相关性低, 低短路比系统并不代表低惯性常数系统, 这是由于系统电压稳定与系统频率稳定的机理不同, 两者特性不耦合且相对独立, 可分别开展分析。本文主要关注电压支撑强度对系统强弱的量化评估。

2) 电压支撑强度量化指标

新能源并网系统中, 系统“强”和“弱”是一个相对的概念, 不是单纯根据接入交流电网的新能源设备容量大小进行评估, 即不能简单判断为新能

源并网容量小的系统, 其电网强度高于新能源并网容量大的电力系统。目前, 常用短路比衡量交流与新能源的相对强弱, 表达式为

$$S_{CR} = \frac{S_{ac}}{P_N} = \frac{U_N^2}{P_N} \cdot \frac{1}{|Z|} = \frac{1}{|Z_{pu}|} \quad (1)$$

式中: S_{CR} 为短路比; S_{ac} 为交流系统短路容量; P_N 为新能源设备额定容量; U_N 为并网母线额定电压; Z 为系统阻抗; Z_{pu} 为系统阻抗标么值。

针对新能源多馈入系统, 上述传统短路比指标存在两点不足: 1) 各并网点的新能源装机容量不同, 难以统一基准容量; 2) 并网点电压的影响不仅与该并网点直接相连的新能源有关, 还要考虑其他馈入新能源的影响。故采用交流系统短路容量与新能源等效并网容量的比值, 提出基于容量计算的短路比指标 S_{CR-S} 。

$$S_{CR-Si} = \frac{S_{ac,i}}{S_{eq,i}} = \frac{|U_N \dot{E}_{eq,i} / \dot{Z}_{ii}|}{\left| \dot{S}_i + \sum_{j=1, j \neq i}^n \dot{r}_{ji} \dot{S}_j \right|} \quad (2)$$

$$\dot{r}_{ji} = \frac{\dot{Z}_{ji}}{\dot{Z}_{ii}} \frac{\dot{U}_j}{\dot{U}_i} \quad (3)$$

式中: S_{CR-Si} 为并网点 i 处的电压支撑强度; $S_{eq,i}$ 为并网点 i 处新能源等效并网容量; $\dot{E}_{eq,i}$ 表示并网点 i 处交流系统电势; \dot{S}_i 、 \dot{S}_j 分别为并网点 i 、 j 新能源装机量; \dot{U}_i 、 \dot{U}_j 分别表示并网点 i 、 j 电压; \dot{Z}_{ii} 、 \dot{Z}_{ij} 分别为系统自阻抗和互阻抗; \dot{r}_{ji} 为新能源场站之间的电压交互影响因子。

根据文献[14]的推导, 可进一步得到短路比与并网点电压的关系, 如式(4)所示。

$$S_{CR-Ui} = \frac{|U_N \dot{E}_{eq,i}|}{|\Delta \dot{U}_i \dot{U}_i|} \quad (4)$$

式中: S_{CR-Ui} 为并网点 i 处的电压支撑强度; $\Delta \dot{U}_i$ 为并网 i 处电压变化量。

由式(4)可知, 短路比指标与并网点电压变化量呈反比, 短路比越大, 并网点电压变化量越小, 系统抗扰动能力越强, 系统强度越大。

1.2 机组开机方式对短路比的影响机理

短路容量作为表征系统某节点与电网联系强弱的标志, 短路容量越大, 意味着该节点与系统等效电源之间的等效阻抗值越小, 即该节点与系统联系

紧密, 表明网络强, 系统电压幅值变化受负荷投切影响小; 反之, 系统强度弱。短路容量 $S_{ac,i}$ 计算公式为

$$S_{ac,i} = \sqrt{3} V_{ac,i} I_{ac,i} \quad (5)$$

式中: $V_{ac,i}$ 为母线 i 处的平均额定电压; $I_{ac,i}$ 为母线 i 处的三相短路电流。

为了分析常规机组不同开机方式对系统短路容量的影响, 考虑到传统同步发电机结构原理, 当电网发生三相短路故障后, 将同步发电机的次暂态电抗作为等值电路与系统相连。三相短路故障等效电路如图 1 所示, 图中: U_s 为交流系统电压; X_T 为网络等效转移电抗; X_L 为故障点与同步发电机接入点之间的等效正序电抗; X_d'' 为同步发电机次暂态电抗。

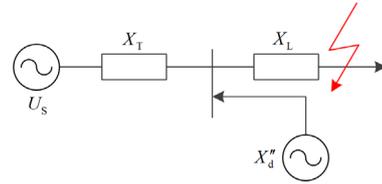


图 1 短路电流计算正序等效电路

Fig. 1 Positive sequence equivalent circuit of short-circuit current calculation

由图 1 可知, 当发生三相短路故障时, 若同步发电机处于停机状态, 则故障点流入的短路电流 I_{ac} 为

$$I_{ac} = \frac{U_s}{X_T + X_L} \quad (6)$$

当同步发电机投入运行时, 则故障点流入的短路电流变为 I'_{ac} , 如式(7)所示。

$$I'_{ac} = \frac{U_s}{X_T // X_d'' + X_L} = \frac{U_s}{\frac{X_T X_d''}{X_T + X_d''} + X_L} \quad (7)$$

由于线路与同步发电机定子绕组为感性, 故 $X_T > X_T // X_d''$, 进而得到 $I'_{ac} > I_{ac}$ 。由此可知, 当常规电源机组投入运行时, 可增加系统短路电流, 进而提高系统短路容量。且由于系统网架结构的固有属性, 同步发电机对系统短路电流的贡献度因其所在节点位置的不同而有所差异, 电气距离越近、容量越大, 所贡献的短路容量越大。

由式(2)可知, 同步发电机通过提高系统短路容量, 进而提高新能源并网点短路比。文献[13]提出临界短路比(critical short circuit ratio, CSCR)指标的概念以建立短路比与系统静态电压稳定之间的关系, 且以临界短路比值 2 作为评判新能源并网点稳定的边界值。当新能源并网点短路比值小于 2 时,

该并网点系统强度弱,由此可以得到式(8)的电网强度约束。

$$\frac{S_{ac}}{\left| \dot{S}_i + \sum_{j=1, j \neq i}^n \dot{r}_{ji} \dot{S}_j \right|} \geq 2 \quad (8)$$

由式(8)可知,当新能源装机容量与系统结构一定时,在电网强度约束下,可得到各新能源并网点的最小母线短路容量要求,由此可建立常规机组开机方式与系统短路容量约束的定量关联,可通过更改机组开机方式来提高新能源并网点的短路容量,从而提高系统强度,将新能源设备极限并网强度约束转化为如何优化机组的开机方式以支撑大规模新能源接入的整数约束问题。本文建立如下隐式函数,以表征机组开机方式与新能源并网点短路比约束边界条件的耦合机理。

$$\mathbf{Z}^{\text{sys}} = f_1(\mathbf{X}, \mathbf{X}_d^n) \quad (9)$$

$$S_{ac} = \frac{1}{\mathbf{Z}_{ii}^{\text{sys}}} \quad (10)$$

$$S_{\text{CR-X}} = f_2(S_{ac}, P^{\text{new}}) \quad (11)$$

式中: \mathbf{Z}^{sys} 、 $\mathbf{Z}_{ii}^{\text{sys}}$ 分别为系统阻抗矩阵和节点 i 的自阻抗; \mathbf{X} 、 \mathbf{X}_d^n 分别为机组开机状态矩阵与机组次暂态电抗矩阵,其中 \mathbf{X} 为二进制变量,0 表示机组不投入运行,1 表示机组运行; $f_1(\cdot)$ 表示机组开机状态与系统阻抗矩阵之间的隐式关系; $f_2(\cdot)$ 建立了机组开机状态与系统短路比之间的隐式关系; $S_{\text{CR-X}}$ 表示与机组运行状态关联的短路比; P^{new} 为新能源场站有功出力。

2 考虑新能源极限并网强度约束的机组组合优化算法

如 1.2 节所述,同步发电机通过提高系统短路容量,进而提高新能源并网点短路比。为保证大规模新能源并网系统的电网强度,需要常规机组为其提供电压支撑,而常规机组开机容量过大必定会挤占新能源消纳空间,故本节基于上述常规电源开机方式与新能源并网点电网强度之间的耦合关系,在满足新能源设备极限并网强度要求的前提下,提出以新能源最大化消纳为目标的机组最小开机方式优化算法。

2.1 算法模型

2.1.1 目标函数

在新能源设备极限并网强度要求的前提下,为了实现最大程度地消纳新能源,故以新能源出力最大为目标(当源端只考虑新能源和常规机组时,新能

源的最大消纳空间等于负荷与常规机组最小出力之差,因此为了最大化新能源消纳空间,需要最小化常规机组开机方式,即新能源消纳目标与常规机组最小开机方式等价)。

$$F = \max \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{n_{\text{ew}}} P_{t,i}^{\text{new}} \quad (12)$$

式中: T 为生产模拟总模拟运行时间,本文取 8760 h; $P_{t,i}^{\text{new}}$ 为 t 时刻新能源场站 i 的有功出力; n_{ew} 为新能源场站数。

2.1.2 约束条件

1) 电力电量平衡约束

$$\sum_{i=1}^{n_{\text{gen}}} P_{t,i}^{\text{g}} + \sum_{j=1}^{n_{\text{ew}}} P_{t,j}^{\text{new}} = P_t^{\text{load}} \quad (13)$$

式中: n_{gen} 为常规机组数; P_t^{load} 为 t 时刻系统总负荷; $P_{t,i}^{\text{g}}$ 为常规机组 i 在 t 时刻的出力。

2) 常规机组爬坡约束

$$\begin{cases} P_{t+1,i}^{\text{g}} - P_{t,i}^{\text{g}} \leq P_i^{\text{upmax}} \\ P_{t,i}^{\text{g}} - P_{t+1,i}^{\text{g}} \leq P_i^{\text{downmax}} \end{cases} \quad (14)$$

式中, P_i^{upmax} 、 P_i^{downmax} 分别表示常规机组 i 的最大上、下爬坡速率。

3) 旋转备用约束

$$\sum_{i=1}^{n_{\text{gen}}} X_{t,i} P_{t,i}^{\text{gmax}} + \sum_{j=1}^{n_{\text{ew}}} P_{t,j}^{\text{new}} - P_t^{\text{load}} \geq P^{\text{rc}} \quad (15)$$

式中: $P_{t,i}^{\text{gmax}}$ 为 t 时刻机组 i 的最大有功出力; $X_{t,i}$ 为机组 i 在 t 时刻的工作状态的二进制变量,1 表示机组处于运行状态,0 表示机组停机; P^{rc} 为系统旋转备用。

4) 新能源场站电网强度约束

$$\frac{S_{ac,i}}{P_{t,i}^{\text{new}} + \sum_{j \neq i} \dot{r}_{ji} P_{t,j}^{\text{new}}} \geq 2 \quad (16)$$

$$S_{ac,i} = \frac{1}{\mathbf{Z}_{ii}^{\text{sys}}} \quad (17)$$

$$\mathbf{Z}^{\text{sys}} = f_1(\mathbf{X}, \mathbf{X}_d^n) \quad (18)$$

其中,新能源场站之间的电压交互影响因子 \dot{r}_{ji} 的计算过程为:首先根据系统网络参数计算导纳矩阵;其次根据遗传算法所给机组开机状态变量更改导纳矩阵中对应节点的自导纳,获得当前机组开机方式下系统导纳矩阵;然后对导纳矩阵求逆,获得系统阻抗矩阵,提取集群内各个新能源节点的自阻抗和互阻抗;最后根据式(3)计算各个新能源场站之间的电压复交互影响因子。

5) 常规机组出力约束

$$X_{t,i} \cdot P_{t,i}^{\text{gmin}} \leq P_{t,i}^{\text{g}} \leq X_{t,i} \cdot P_{t,i}^{\text{gmax}} \quad (19)$$

式中, $P_{t,i}^{\text{gmin}}$ 为 t 时刻机组 i 的最小有功出力。

6) 新能源出力约束

$$0 \leq P_{t,i}^{\text{new}} \leq P_{t,i}^{\text{new*}} \quad (20)$$

式中, $P_{t,i}^{\text{new*}}$ 为新能源场站 i 在 t 时刻的理论最大出力。

2.2 模型求解方法

本文所提考虑电网强度约束的机组组合优化算法模型是一个混合整数非线性规划问题, 其非线性主要体现在新能源场站电网强度约束, 这也是增加模型求解难度的重要因素。该非线性是由常规机组开机方式与新能源场站电网强度耦合造成的, 且不同机组开机方式与系统短路容量计算之间的函数关系难以显式表达。故为了实现模型的求解, 需要对上述模型中的非线性项进行解耦; 当系统结构一定且临界短路比值取 2(即新能源设备极限并网强度要求)时, 由式(8)计算所得到的并网节点新能源出力, 也是该并网节点在电网强度约束下的最大新能源出力值 P^{newmax} ; 由 1.2 节可知, 常规机组开机量与机组所处位置均可影响系统短路容量, 当某一机组开机方式可提高新能源并网节点短路容量时, 计算得到的短路比值越大, 因此在电网强度约束下, 计算所得到的新能源并网节点最大新能源出力值 P^{newmax} 也会相应提高; 也可以通过改变机组开机方式来提高系统短路容量, 进而提高 P^{newmax} , 提升新能源消纳能力。通过 P^{newmax} 可将新能源场站电网强度约束转换为新能源场站最大出力限值约束, 故本文以此变量作为中间变量, 对不同机组开机方式与新能源场站电网强度之间的耦合关系进行解耦, 得到如式(21)、式(22)的双层优化模型。

$$\left\{ \begin{array}{l} \max F = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{n_{\text{ew}}} P_{t,i}^{\text{new}} \\ \text{s.t. 式(13)一式(15), 式(19), 式(20)} \end{array} \right. \quad (21)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \max F = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{n_{\text{ew}}} P_{t,i}^{\text{newmax}} \\ \text{s.t. } \left\{ \begin{array}{l} \frac{S_{\text{ac},i}}{P_{t,i}^{\text{newmax}} + \sum_{j \neq i} r_{jt} P_{t,j}^{\text{new}}} \geq 2 \\ S_{\text{ac},i} = \frac{1}{Z_{ii}^{\text{sys}}} \\ \mathbf{Z}^{\text{sys}} = \mathbf{Y}^{-1} \\ \mathbf{Y} = f(\mathbf{X}) \\ 0 \leq P_{t,i}^{\text{newmax}} \leq P_{t,i}^{\text{instal}} \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (22)$$

式(21)、式(22)分别为双层模型的上层和下层,

上层模型目标函数为最大程度消纳新能源, 下层模型目标函数为最大化新能源场站的出力限值。式中: $P_{t,i}^{\text{newmax}}$ 为新能源极限并网强度约束下的场站 i 的最大有功出力; \mathbf{Y} 为系统导纳矩阵; $f(\cdot)$ 表示不同机组开机方式与系统导纳矩阵之间的函数关系; $P_{t,i}^{\text{instal}}$ 为新能源场站 i 的装机容量。

针对上层模型中的新能源出力约束, 增加如式(23)所示的约束条件, 实现上下层模型之间的迭代交替优化。

$$0 \leq P_{t,i}^{\text{new}} \leq P_{t,i}^{\text{newmax}} \quad (23)$$

针对下层模型中的新能源场站电网强度约束, 由式(22)可知, 系统阻抗矩阵为导纳矩阵的逆, 而软件求逆过程中无法对决策变量进行求解, 故导纳矩阵中机组运行状态变量不能以决策变量的形式存在, 由此本文将机组运行状态决策变量转换为遗传算法输入变量的形式(即遗传算法输入变量为 0-1 变量, 表示各机组状态): 获得不同机组开机状态在新能源设备极限并网强度要求下的各新能源场站有功出力限值; 解决不同机组开机方式与系统短路容量计算之间的函数关系难以显式表达的难题。

此外, 为了减少遗传算法输入变量维数, 且考虑到工程应用中常规机组停机与运行时间均较长的实际情况, 将机组开机方式变量以天为单位进行优化求解, 通过滚动优化求解的方式获得新能源设备极限并网强度要求下的机组全年最小开机方式。

经过上述处理后, 上下层模型均转换为含线性不等式约束的混合整数优化问题。其中, 为了保证遗传算法所给机组开机方式变量能满足上层模型中系统的电力电量平衡约束, 故对机组状态变量作如下约束限制:

$$\sum_{i=1}^{n_{\text{gen}}} P_i^{\text{gmax}} \cdot X_i \geq P_d^{\text{lmax}} \quad (24)$$

$$\sum_{i=1}^{n_{\text{gen}}} P_i^{\text{gmin}} \cdot X_i \leq P_d^{\text{lmin}} \quad (25)$$

式中, P_d^{lmax} 、 P_d^{lmin} 分别表示某天负荷的最大值和最小值。式(24)表示运行机组的最大出力之和要大于当天负荷的最大值。式(25)表示运行机组的最小出力之和要小于当天负荷的最小值。最后本文采用遗传算法+CPLEX 求解器的混合策略对所提模型进行求解, 求解流程如图 2 所示。

3 算例分析

本节以三北地区某新能源汇集送端系统为例, 进行仿真实验。工程算例系统如图 3 所示, 该新能

源汇集区域拥有 130 个新能源场站，分别汇集于 4 个 500 kV 变电站，并通过 1050 kV 高压站经特高压直流送出，新能源总装机容量为 11 000 MW 左右，其中风电装机容量为 7500 MW 左右，光伏装机容量为 3500 MW；常规机组共 21 台，总装机容量为 13 500 MW 左右。

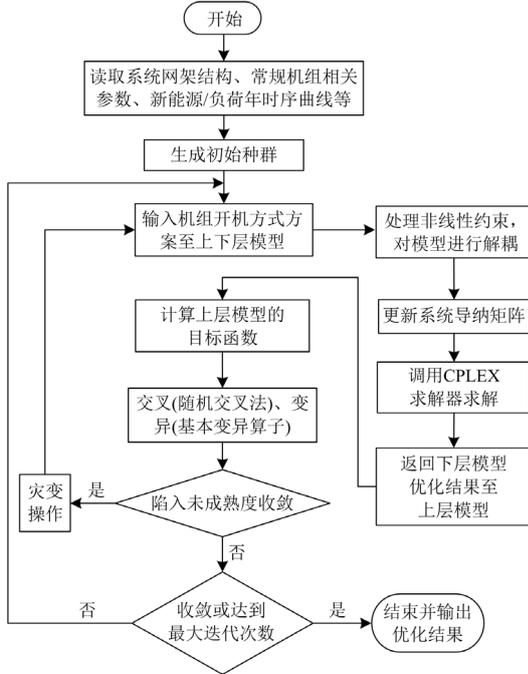


图 2 求解流程

Fig. 2 Solution flow of algorithm

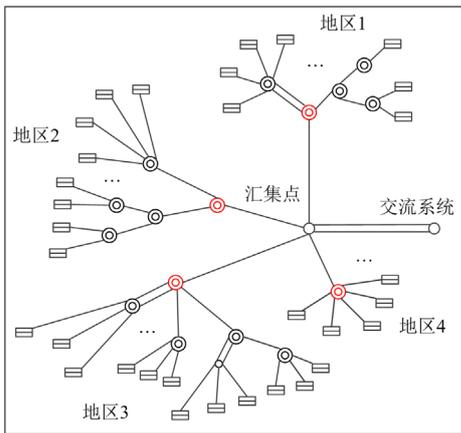


图 3 工程算例示意

Fig. 3 Structure of simulation system

3.1 机组不同开机比例下对系统影响分析

为了分析机组不同开机方式对系统的影响，本文设置以下 4 种方案。

- 方案一：所有常规机组均不开机(开机比例为 0)。
- 方案二：机组开机量占所有机组的 30%(开机比

例为 30%)。

方案三：机组开机量占所有机组的 50%(开机比例为 50%)。

方案四：全部常规机组均开机(开机比例 100%)。

各方案下的计算结果如表 1 所示，由于篇幅有限，故本文只展示部分新能源场站的计算结果。由表 1 可知，随着机组开机比例的增大，各新能源场站的短路容量也逐渐增大；且在短路比约束下的新能源场站出力限值 P^{newmax} 也在增大，当机组开机比例达到 100%时，大部分新能源场站的 P^{newmax} 达到了装机容量，此结果说明，常规机组提供了足够的短路容量以支撑新能源集群并网系统的接入，此时弱电网强度不再是制约新能源消纳的主导因素。

表 1 机组不同开机比例下计算结果对比

Table 1 Comparison of calculation results under different starting ratios of unit

机组开机比例/%	新能源场站	短路容量/MW	P^{newmax} / MW	P^{instal} / MW	$P^{newmax} = P^{instal}$ 的新能源场站数/个
0	1	238.78	21.25	90	3
	2	467.76	21.25	100.5	
	3	559.11	29.92	150	
30	1	246.38	38.94	90	24
	2	485.53	48.70	100.5	
	3	613.95	102.37	150	
50	1	250.69	63.83	90	69
	2	489.72	72.08	100.5	
	3	618.40	130.34	150	
100	1	251.79	78.66	90	121
	2	494.43	100.5	100.5	
	3	620.95	150	150	

为了分析 4 种方案下对系统运行短路比的影响，以新能源场站 1 为例，计算了 4 种开机方式下新能源出力大发时段场站的运行短路比，结果如图 4 所示。可知，随着机组开机比例的增大，新能源场站的运行短路比也增大；当常规机组不开机时，新能源场站大部分时刻运行短路比小于 2，电网强度极其薄弱；当开机比例高于 30%时，新能源场站大部分时刻的运行短路比均高于 2，故常规机组提供了较好的支撑作用。在图 4 中，部分时刻新能源场站运行短路比较高，是因为此时新能源场站受天气影响，有功出力较低，故计算所得的运行短路比较高。

3.2 不同优化模型下机组开机方式对比分析

为了分析新能源极限并网强度约束对机组开机方式决策的影响，设置两个对比方案：1) 不考虑新能源极限并网强度约束的传统生产模拟(即在本文模型中去掉新能源场站电网强度约束)；2) 本文所考虑新能源极限并网强度约束的机组最小开机方式

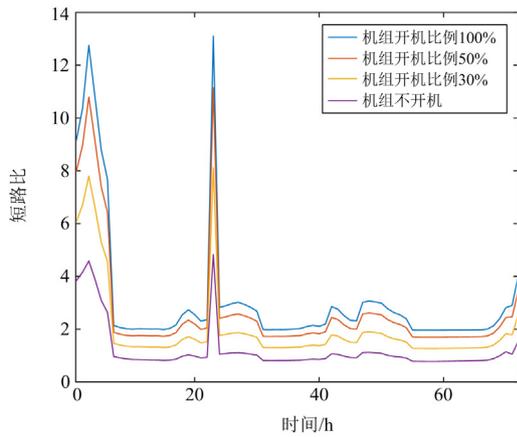


图4 新能源场站1运行短路比

Fig. 4 Operation short circuit ratio of new energy station 1

优化模型, 结果如图5—图7所示。

由结果可知, 为了满足新能源极限并网强度约束, 本文所提模型的常规机组开机数和开机量均高于传统时序生产模拟方法, 以支撑新能源集群并网系统的接入。

3.3 不同开机方式下系统新能源消纳能力分析

进一步, 在上述(3.2节)机组开机方式下, 为分析不同情况下系统的新能源消纳能力, 设置如下3种情况进行对比分析。

情况一: 在图5所示机组开机方式下, 不考虑短路比约束(此时新能源场站的出力约束边界值为理论最大出力, 即式(20)), 计算系统新能源最大可消纳量。

情况二: 在图5所示的机组开机方式下, 考虑短路比约束(此时新能源场站的出力约束边界值为式(20)和式(23)), 计算系统新能源最大可消纳量。

情况三: 在本文所提模型(图6)下, 计算系统新能源最大可消纳量。

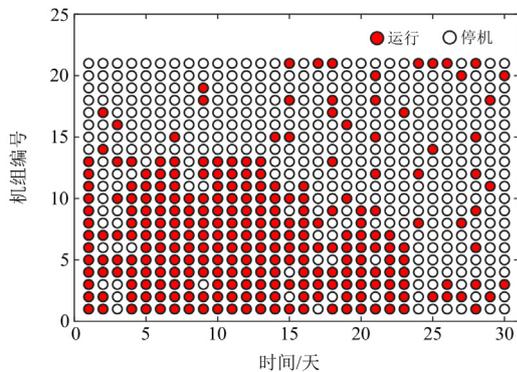


图5 不考虑新能源极限并网强度约束的机组状态变化

Fig. 5 Unit state change without considering the limit grid-connected strength constraint of new energy

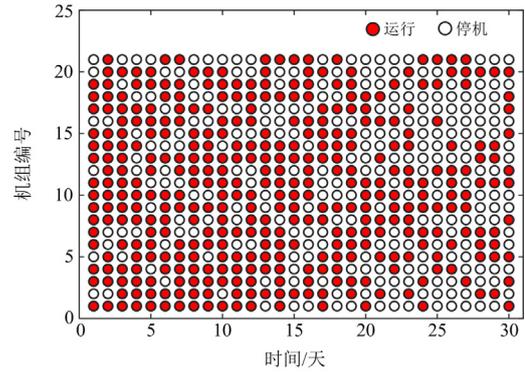


图6 本文模型的机组状态变化

Fig. 6 Unit state change of the model in this paper

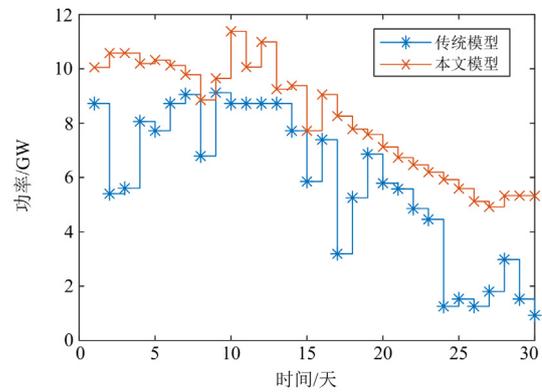


图7 不同模型机组开机量对比

Fig. 7 Unit capacity comparison of different models

由表2可知, 情况一的新能源最大可消纳量高于情况二, 表明在考虑电网强度约束后, 可准确评估系统的新能源消纳能力, 不考虑新能源集群并网系统强弱的新能源消纳评估方法过于乐观; 情况三的新能源最大可消纳量高于情况二, 表明在考虑系统电网强度约束后, 通过本文所提方法来优化机组开机方式可有效提高系统强度, 从而提升新能源消纳能力。

表2 不同情况下系统新能源消纳能力对比

Table 2 Comparison of new energy consumption capacity of system under different conditions

时间/h	新能源最大可消纳量/MWh		
	情况一	情况二	情况三
24	12.64×10^4	8.58×10^4	11.28×10^4
168	58.70×10^4	46.84×10^4	52.59×10^4
720	192.70×10^4	167.92×10^4	184.11×10^4

4 结论

本文分析了常规机组开机方式与新能源并网系统强度之间的耦合关系, 在传统时序生产模拟模型

的基础上, 加入电网强度约束, 提出一种考虑新能源极限并网强度约束的常规机组最小开机方式优化方法。所得结论如下:

1) 以临界短路比值 2 为边界条件, 推导了新能源并网点电网强度约束下, 对应母线所需的最小母线短路容量, 建立了机组开机方式与短路比指标之间的关联;

2) 考虑常规机组开机方式与系统电网强度提升作用机理, 在满足新能源设备极限并网强度要求的前提下, 提出以新能源最大化消纳为目标的机组最小开机方式优化算法, 可优化机组运行调度方式;

3) 案例分析表明, 相比传统机组开机优化模型, 本文建立的模型可通过优化常规机组开机提升电网强度, 减少由于电网强度不足导致的新能源限电量。

本文主要分析了常规机组开机方式对系统短路容量的影响, 进而建立了机组开机方式与短路比指标之间的关联; 但随着新能源的快速发展, 新能源设备也将影响系统短路容量, 故后续研究中可考虑建立新能源设备与系统短路容量之间的耦合模型。

参考文献

[1] 裴蕾, 卫志农, 陈胜, 等. 交直流混合配电网多阶段随机优化调度模型[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(14): 23-32.
PEI Lei, WEI Zhinong, CHEN Sheng, et al. Multi-stage stochastic optimization dispatch model for AC-DC hybrid distribution power networks[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(14): 23-32.

[2] 常海军, 霍超, 刘福锁, 等. 提高弱送端电网暂态电压稳定水平的调相机优化配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(6): 90-95.
CHANG Haijun, HUO Chao, LIU Fusuo, et al. Research on optimal allocation method of synchronous condensers for improving transient voltage stability level of weak sending-end power grid[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(6): 90-95.

[3] 张晶晶, 陈博进, 尉静慧, 等. 一种交直流系统连锁故障预测方法及风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(4): 125-132.
ZHANG Jingjing, CHEN Bojin, WEI Jinghui, et al. AC-DC system cascading failure simulation method and risk assessment[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(4): 125-132.

[4] 于琳, 孙华东, 徐式蕴, 等. 电力电子设备接入电压支撑强度量化评估指标综述[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(2): 499-515.
YU Lin, SUN Huadong, XU Shiyun, et al. Overview of

strength quantification indexes of power system with power electronic equipment[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(2): 499-515.

[5] 袁辉, 辛焕海, 王冠中, 等. 含 SVG 的新能源多馈入系统振荡分析和广义短路比计算[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(14): 38-46.
YUAN Hui, XIN Huanhai, WANG Guanzhong, et al. Analysis on oscillation of multi-infeed system with renewable energy and static var generator and calculation of its generalized short-circuit ratio[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(14): 38-46.

[6] 康思伟, 董文凯, 郭诗然, 等. 基于虚拟同步机控制的新能源发电并网系统小干扰稳定临界短路比[J]. 电力建设, 2022, 43(3): 131-140.
KANG Siwei, DONG Wenkai, GUO Shiran, et al. Critical short-circuit ratio of small-signal stability for a grid-connected renewable power generation system based on virtual synchronous generator control[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(3): 131-140.

[7] 许晓菲, 牟涛, 贾琳, 等. 大规模风电汇集系统静态电压稳定实用判据与控制[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(9): 15-19, 33.
XU Xiaofei, MOU Tao, JIA Lin, et al. Practical criteria of static voltage stability in power systems with high wind penetration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(9): 15-19, 33.

[8] 徐箭, 张华坤, 孙涛, 等. 多馈入直流系统的特高压直流接入方式优选方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(6): 58-63, 92.
XU Jian, ZHANG Huakun, SUN Tao, et al. Optimal selection of UHVDC connection mode to multi-infeed HVDC system[J]. Electric Power Automatic Equipment, 2015, 35(6): 58-63, 92.

[9] GE Energy Consulting. Fernandes report to NERC ERSTF for composite short circuit ratio (CSCR) estimation guideline[R]. 2015.

[10] 辛焕海, 董炜, 袁小明, 等. 电力电子多馈入电力系统的广义短路比[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(22): 6013-6027.
XIN Huanhai, DONG Wei, YUAN Xiaoming, et al. Generalized short circuit ratio for multi power electronic based devices infeed to power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(22): 6013-6027.

[11] 辛焕海, 甘德强, 鞠平. 多馈入电力系统广义短路比: 多样化新能源场景[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(17): 5516-5526.
XIN Huanhai, GAN Deqiang, JU Ping. Generalized short circuit ratio of power systems with multiple power electronic devices: analysis for various renewable power generations[J].

- Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17): 5516-5526.
- [12] 朱凌志, 曲立楠, 刘纯, 等. 新能源发电集群的改进等效短路比计算方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(22): 74-82.
ZHU Lingzhi, QU Linan, LIU Chun, et al. Improved calculation method of equivalent short-circuit ratio for power generation cluster of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(22): 74-82.
- [13] 于琳, 孙华东, 赵兵, 等. 新能源并网系统短路比指标分析及临界短路比计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(3): 919-929.
YU Lin, SUN Huadong, ZHAO Bing, et al. Short circuit ratio index analysis and critical short circuit ratio calculation of renewable energy grid-connected system[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(3): 919-929.
- [14] 周莹坤. 新能源同步机提升高比例新能源电网稳定性的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
ZHOU Yingkun. Study on new energy synchronous generator to improve the stability of high proportion new energy grid[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019.
- [15] 张琪祁, 冯煜尧, 崔勇. 多直流馈入背景下综合考虑调峰和电压稳定的上海电网开机方式研究[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(10): 54-60.
ZHANG Qiqi, FENG Yuyao, CUI Yong. Overall consideration of peak regulation and voltage stability on scheduling units in Shanghai power grid with multiple HVDC feed-in[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(10): 54-60.
- [16] 张顺, 葛智平, 郭涛, 等. 大规模新能源接入后系统调峰能力与常规电源开机方式关系研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 106-110.
ZHANG Shun, GE Zhiping, GUO Tao, et al. Research on relationship between the capacity of systematic peak regulation and conventional power startup mode after access to large-scale new energy[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 106-110.
- [17] 宋朋飞, 张锋, 亢朋朋, 等. 基于调峰及网架约束的新疆电网风电接纳能力研究[J]. 四川电力技术, 2018, 41(1): 14-21.
SONG Pengfei, ZHANG Feng, KANG Pengpeng, et al. Research on wind power accommodation capability of Xinjiang power grid based on peak shaving and grid structure constraints[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2018, 41(1): 14-21.
- [18] 杨凌辉, 崔勇. 上海大都市电网“强馈入弱开机”方式下电压稳定分析[J]. 华东电力, 2014, 42(12): 2755-2757.
YANG Linghui, CUI Yong. Voltage stability analysis for Shanghai metropolitan grid with high-level power import and scale-reduced online units[J]. East China Electric Power, 2014, 42(12): 2755-2757.
- [19] 张红丽, 刘福锁, 李威, 等. 基于机组电压支撑效果的直流近区火电最小开机方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(23): 141-147.
ZHANG Hongli, LIU Fusuo, LI Wei, et al. Minimum startup method of a DC near-field thermal power unit based on a unit voltage supporting effect[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(23): 141-147.
- [20] 葛晓琳, 刘亚, 符杨, 等. 考虑惯量支撑及频率调节全过程的分布鲁棒机组组合[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(12): 4043-4058.
GE Xiaolin, LIU Ya, FU Yang, et al. Distributed robust unit commitment considering the whole process of inertia support and frequency regulations[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(12): 4043-4058.
- [21] 牛栓保, 柯贤波, 任冲, 等. 基于短路容量量化评估的大规模新能源直流送端电网运行方式优化方法[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(12): 123-129.
NIU Shuanbao, KE Xianbo, REN Chong, et al. Optimal method of operation modes for large-scale new energy DC sending-end power grid based on short circuit capacity quantitative assessment[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(12): 123-129.
- [22] Australian Energy Market Operator. System strength in the NEM explained[R]. 2020.
- [23] Australian Energy Market Operator. Renewable integration study: stage 1 report[R]. Australian Energy Market Operator, 2020.
- [24] 孙华东, 王宝财, 李文锋, 等. 高比例电力电子电力系统频率响应的惯量体系研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(16): 5179-5191.
SUN Huadong, WANG Baocai, LI Wenfeng, et al. Research on inertia system of frequency response for power system with high penetration electronics[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(16): 5179-5191.

收稿日期: 2022-12-12; 修回日期: 2023-03-01

作者简介:

秦建茹(1995—), 女, 硕士研究生, 助理工程师, 研究方向为可再生能源并网和电力系统灵活性; E-mail: qinjrlk@126.com

李海波(1990—), 男, 通信作者, 博士, 副研究员, 研究方向为可再生能源并网和电力系统灵活性。E-mail: lihaibo@tsinghua-eiri.org

(编辑 姜新丽)