

异步联网方式下基于送端系统支撑能力调整的直流外送能力优化策略

张丹¹, 付宇昂², 刘艳², 赛翔羽¹, 刘希特²

(1. 云南电力调度控制中心, 昆明 650032; 2. 华北电力大学电力工程系, 河北 保定 071003)

摘要: 高比例新能源的接入对系统的稳定性提出了挑战, 针对采用异步联网的直流送端系统, 研究其在高新能源占比下保障直流通道的大容量稳定外送具有重要意义。引入系统电压与频率支撑能力, 以最大化系统外送能力与新能源消纳能力、最小化电压支撑能力失衡度为优化目标, 建立了基于送端系统支撑能力调整的直流外送能力优化模型。将模型求解分为主、子两个问题, 采用基于改进多目标粒子群算法的 IMOPSO-PSD 联合优化仿真算法对模型进行求解, 通过变异系数法在计及电压支撑能力失衡度的基础上筛选出最优运行方式。最后, 以高新能源占比的 IEEE 39 节点异步直流送端电网为例验证了所提方法的有效性。

关键词: 系统支撑能力; 直流异步联网; 直流外送优化; 新能源消纳

Optimization Strategy of DC External Transmission Capability Based on the Support Capability Adjustment of the Sending-End System Under Asynchronous Networking Mode

ZHANG Dan¹, FU Yuang², LIU Yan², SAI Xiangyu¹, LIU Xite²

(1. Yunnan Electric Power Dispatching and Control Center, Kunming 650032, China; 2. Department of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Baoding, Hebei 071003, China)

Abstract: The access of high proportion of new energy poses a challenge to the stability of the system, and it is of great significance to study the DC feeder system with asynchronous networking to ensure the large-capacity and stable transmission of the DC channel under the proportion of new energy. Introducing system voltage and frequency support capabilities, with the optimization goal of maximizing system external transmission capacity and new energy consumption capacity, and minimizing the imbalance of voltage support capacity, the DC external transmission capacity improvement optimization model based on the optimization of the sending-end system support capacity is established by introducing the system voltage and frequency support capacity. The model is divided into main and sub-problems, and the IMOPSO-PSD joint optimization simulation algorithm based on the improved multi-objective particle swarm algorithm is used to solve the model, and the optimal operation mode is screened out by the coefficient of variation method taking into account the imbalance of the voltage support capacity. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified by taking the IEEE 39-node asynchronous DC sending-end grid model with high proportion new energy as an example.

Key words: system support capacity; DC asynchronous networking; DC external transmission optimization; new energy consumption

0 引言

为应对全球气候变化挑战, 支撑经济社会高质

量发展, 我国提出了“2030 年碳达峰、2060 年碳中和”的国家战略^[1]。构建以新能源为主体的新型电力系统, 提升电网对清洁能源的消纳水平, 已成为实现“双碳”目标的现实需要。

我国一次能源分布不均、源荷逆向分布特点显著, 远距离交直流输电为提升新能源消纳水平、实

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U22B2099)。

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China (U22B2099).

现区域间源荷时空平衡提供了有力支撑。随着“西电东送,全国联网”战略的实施,我国目前已形成大规模跨区域交直流互联的电网络局。在实现对新能源大范围、大规模消纳的同时,交直流混联系统交互耦合特性也对电网运行安全带来了潜在风险。为应对同步联网通道发生故障引发系统大范围潮流转移及可能出现的功角失稳和电压失稳问题,南方电网率先实现省级电网与大区域电网的异步互联,使得南方电网成为了目前世界上结构最复杂的电力系统之一^[2]。

异步联网方式下,送端电网的同步规模减小,系统机械惯性大幅下降^[3],频率调节能力与电压支撑能力显著减弱。文献[4-5]指出,发生故障后,新能源汇集系统存在过电压导致的新能源机组连锁脱网或设备损坏风险。新能源机组抗扰性弱、过载能力低、对频率和电压偏差耐受能力不足等突出问题严重威胁送端系统安全,制约了清洁能源直流外送规模的有效提升^[6]。此类问题也增加了调控部门的工作难度,对调控运行方式的合理安排提出了挑战。若以提高新能源机组渗透率为方式安排的主要目标,方式人员通常以某基础运行方式为起点,通过逐一调整或批量增加新能源场站的出力并同时削减同步机组的出力实现对运行方式的调整。调整过程中若出现系统潮流不收敛、断面功率越限值等问题,则需要调控方式人员根据经验对机组、无功功率补偿装置进行手动调整直至平衡,费时费力。可以预见,经过上述运行方式的手动调整过程后,由于新能源机组渗透率的提升,可能存在系统局部电压支撑能力不足等潜在安全隐患。

从送端系统的角度看,直流外送的容量大小主要受送端系统对直流闭锁承受能力的制约。文献[3]考虑了直流闭锁下送端电网的惯性、备用与频率稳定等相关约束,提出了一种计及频率稳定的直流联络线极限承载能力评估模型,可辅助预防大容量直流双极闭锁触发安稳控制的第三道防线动作。文献[7]以解析表达式的方式给出了单回大容量直流双极闭锁场景下协同考虑电网第二道防线紧急控制措施时暂态频率与闭锁容量间的等式关系。文献[8-9]从直流闭锁容量与过电压之间的关系入手来衡量直流通道的输电容量。

从预防控制的角度出发,提高送端系统的电压和频率支撑能力对于保障异步联网通道运行安全、

提升对清洁能源的外送能力具有基础性作用。文献[10]指出云南电网作为未来全国新能源渗透率最高的独立省级同步电网之一,安全稳定运行依赖于同步机提供的惯量和电压支撑。文献[11]以送端系统整流站的多直流短路比为约束,保证了高新能源渗透率下直流系统的稳定运行,随后在考虑了 $N-1$ 故障、短路电流约束的情况下得出系统的最大新能源渗透率。文献[12]在预测风电出力的基础上通过调节各风电机组的运行方式使并网点处的短路比符合要求。文献[13]从优化新能源消纳的角度介绍了火电机组、储能、无功功率补偿装置等提高新能源并网点处短路比的方法,并证明了优化短路比对提升新能源消纳能力的重要意义。

上述研究将电网稳定性的重点聚焦在系统的电压支撑能力上,明确了改善电压支撑能力对增强新能源并网稳定性、提升新能源消纳能力有着重要意义。在系统频率支撑能力的相关研究中,文献[14]以最大暂态频率偏差作为衡量系统频率稳定的指标,给出了频率偏差与系统惯量之间的关系式,实现了频率稳定与经济性的协调优化。文献[10]则以临界频率变化率(rate of change of frequency, RoCoF)作为保障频率稳定的约束条件,给出了RoCoF与临界转动惯量之间的计算公式,通过监控惯量来保障系统的频率支撑能力。文献[15]针对水电送出系统的机组运行特性,从频率、电压稳定等角度给出了单回直流和同送同受直流群最大可输送功率计算方法,并从优化直流近区开机等方面研究了提升直流承载能力的运行措施。文献[16]以云南异步联网系统仿真为依据,将系统最大频率偏差和频率变化率作为安全约束条件对云南电网对新能源的承载能力实现了评估。

综上所述,现有研究已从电压和频率支撑能力等方面对提升新能源消纳水平与保障送端系统稳定性之间的平衡进行了有益的探索,但通过送端系统运行方式优化增强系统支撑能力,进而对新能源消纳水平和直流外送能力进行协同提升的研究鲜有报道。据此,本文以异步联网方式的送端交直流系统为研究对象,综合考虑高新能源占比送端电网的运行特性,以新能源并网点短路比与暂态频率偏差作为系统电压与频率支撑能力的表征指标,并引入电压支撑能力失衡度指标,建立基于送端系统支撑能力优化的直流外送能力提升多目标优化模型。将模

型分为主优化与子运算两部分,联合改进多目标粒子群优化算法与电力系统仿真软件PSD进行求解。进一步,通过变异系数法实现对系统最优运行方式的决策。最后,以大规模新能源并网的改进IEEE 39节点直流异步联网系统为例对本文所提方法的有效性进行了仿真验证。

1 直流送端系统新能源支撑能力

1.1 新能源多场站短路比

短路容量是常用的表征电网电压支撑能力的重要指标,短路容量小则表明网络电气联系薄弱^[17]。本文采用计及多新能源场站间相互影响的新能源多场站短路比(multiple renewable energy stations short circuit ratio, MRSCR)作为电网电压支撑能力的指标,用以表征系统电压稳定性。利用多端口戴维南等值,可以得到图1所示的 $i(i=1, 2, \dots, n)$ 个新能源场站同时接入交流系统的简化等值模型示意图。

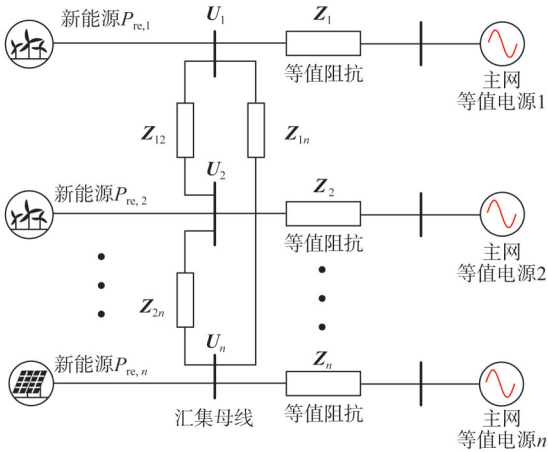


图1 多新能源场站接入的交流系统简化模型

Fig. 1 Simplified model of AC system connected with multiple renewable energy stations

本文将折算的并网点 i, j 间等值阻抗用 Z_{ij} 表示, Z_i 为主网等值电源 i 与对应并网点间的系统侧折算等值阻抗; U_i 为并网母线电压; $P_{re, i}$ 为新能源发电场站并网母线 i 处的注入的有功功率。在实际工程运行中,通常可以忽略系统等值阻抗中电阻部分的影响^[18],此时MRSCR的计算公式 M_i 可表示为:

$$M_i = \frac{S_{ac, i}}{P_{re, i} + \sum_{j \in i, j \neq i} \left| \frac{Z_{eqij} U_i}{Z_{eqii} U_j} \right| P_{re, j}} \quad (1)$$

式中: $S_{ac, i}$ 为新能源发电场站并网母线 i 处的三相短路容量; $|Z_{eqij}/Z_{eqii}|$ 为新能源并网母线 i 和 j 之间的功率折算因子,反映了各新能源发电设备电网侧接入点或新能源场站并网点等值阻抗的幅值差异。需要注意的是, Z_{eqij} 为新能源并网母线处的交流电网等值阻抗矩阵的第 i 行、 j 列元素,与图1实际电网中的 Z_{i2} 和 Z_i 等折算值之间并无实际对应关系。

使用MRSCR作为电网电压支撑强度指标时,根据南方电网安全稳定计算分析导则^[19],新能源场站并网点的临界短路比 M_{min} 通常不低于 2.0 ^[18]。

1.2 系统最大暂态频率偏差

频率支撑能力是指电力系统在发生大的功率扰动后阻止频率偏离系统额定频率的能力^[20]。为了简化工程计算分析,通常使用最大暂态频率偏差对频率稳定进行判别^[21],本文以此作为系统频率支撑能力的表征指标来保证异步直流送端的频率稳定。系统有功功率缺额和有功功率盈余事故下的最大暂态频率偏差可统一表示为^[14]:

$$\begin{cases} \Delta f_{\max} = |f_{\text{vertex}} - f_0| \\ \Delta f_{\max} = f_{\text{db}} + \frac{\Delta P^2 f_0}{4I^{\text{sys}} R^{\text{sys}}} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\Delta f_{\max}$ 为最大暂态频率偏差; f_{vertex} 为系统频率最大值; f_0 为系统的额定频率; f_{db} 为一次调频死区; ΔP 为不平衡功率; R^{sys} 为系统等值一次调频相应速率, MW/s; I^{sys} 为系统在线惯量, MW/s。当系统中有 N 台发电机时, I^{sys} 为所有开机机组惯性时间常数的线性组合,如式(3)所示。

$$I^{\text{sys}} = \sum_{i=1}^N H_i S_{Ni} x_i \quad (3)$$

式中: N 为同步发电机数量; H_i 为发电机 i 的惯性时间常数, s,对于一台发电机而言,其值是恒定不变的; S_{Ni} 为发电机 i 的额定容量, MW; x_i 为表征发电机 i 开停机的状态量。

为防止频率波动过大所导致的新能源机组脱网,最大频率偏差安全值通常不大于 1 Hz ^[19, 22-23]。

2 基于送端系统支撑能力调整的直流外送能力优化模型

2.1 送端系统支撑能力调节

在上述论述中已指出,目前在电网调控方式部门对运行方式的调整过程繁琐费时,且还需面对系统支撑能力不足等稳定性隐患。同时,方式安排布

置严重依赖个人经验, 经验不足者极易出现因电压支撑能力分布不均导致弱支撑能力地区机组脱网的问题, 影响系统外送能力与新能源消纳水平的提升。已有研究证明, 短路故障后的暂态过电压峰值与新能源汇集地区的风机单机出力大小、开机数量都有着一定的关系^[24]。

在系统频率支撑能力调节方面, 异步联网的送端电力系统除需计及运行过程中的常见扰动场景, 还需重点考虑大容量直流闭锁等严重故障对系统造成的冲击。电力系统运行稳定控制一般设置了三道防线^[25], 为了避免触发高频切机, 第一道防线和第二道防线通常协同动作以抑制系统频率失稳。但由于新能源机组和水电机组的运行方式与季节密切相关, 若火电机组装机占比偏低, 在部分季节可能出现系统的直流 FLC 上、下调节能力较弱, 同步机稳控切机的容量受限的问题, 此时一旦发生直流闭锁等故障, 将对系统的第二道防线带来巨大压力。因此, 为应对因系统频率支撑能力不足可能引发的潜在运行安全风险, 依据系统内部可调控的临界惯量对直流外送规模进行管控, 以保证系统第一道防线的抗扰韧性就显得尤为重要。

综上所述, 本文通过对各机组运行方式的优化调节来实现对送端系统的电压支撑能力与潮流分布的优化与改善。在此基础上, 计及系统频率支撑能力约束, 在保障送端系统稳定运行的情况下实现外送能力、新能源消纳水平与电压支撑能力之间的协调优化提升。

2.2 目标函数

按照上述建模思路, 本模型共包含 3 个优化目标, 即在保障最大化系统直流外送容量与最大化系统新能源消纳能力的同时, 提出电压支撑能力失衡度指标用以平衡新能源场站出力水平与电压支撑能力水平之间的关系。

1) 直流外送能力。本文在计及线路网损的基础上, 以供、需平衡为前提构建了直流外送容量评估式, 如式(4)所示。其中, 直流外送能力评估指标 F_1 由外送容量指标 F_{DC} 与重载指标 F_P 所构成。

$$F_1 = F_{DC} - F_P \quad (4)$$

$$\begin{cases} F_{DC} = \sum_{i=1}^N P^i - \sum_{j=1}^{N_{load}} P_{load}^j - \sum_{k=1}^{N_{loss}} P_{loss}^k \\ F_P = \alpha N_{heavy} \end{cases} \quad (5)$$

式中: P^i 、 P_{load}^j 、 P_{loss}^k 分别为第 i 个发电机有功功率出力、第 j 个负荷水平和第 k 个线路有功功率损耗; N 、 N_{load} 、 N_{loss} 分别为有功功率出力、负荷水平和有功功率损耗的数量。为保障送端系统的稳定运行, 最大限度优化送端潮流均匀分布, 在外送容量指标 F_{DC} 后施加重载指标 F_P , 由线路重载惩罚系数 α 与重载支路数量 N_{heavy} 组成。当出现重载线路时, 会给予相应的限制, 保障系统潮流的合理分布。

2) 新能源消纳能力。假设系统内部新能源机组主要为风电与光伏, 则系统新能源消纳能力指标 F_2 可表示为所有风电、光伏机组当前出力之和, 如式(6)所示。

$$F_2 = \sum_{i=1}^{N_F} P_F^i + \sum_{j=1}^{N_G} P_G^j \quad (6)$$

式中: P_F^i 和 P_G^j 分别为第 i 个风电机组和第 j 个光伏机组的当前有功功率; N_F 、 N_G 分别为风电与光伏机组数量。

3) 电压支撑能力失衡度 (voltage support imbalance degree, VSID)

由上述论述结合式(1)可得出随着新能源机组出力水平的不断提高, 并网点处的 MRSCR 水平将不断降低, 为了平衡新能源机组出力水平与电压支撑能力之间的矛盾, 理想的调节方式是增加强支撑能力地区的新能源机组出力使其尽可能全部消纳, 同时合理规划弱支撑能力地区的弃风、弃光措施。本文首先以机组弃风或弃光容量 W_i 为系数, 可消除已达到最大消纳机组由于自身硬约束对目标参数的影响; 随后以电压支撑能力失衡度最小值为目标, 从保障全网 MRSCR 均衡度入手, 来平衡新能源机组出力水平与电压支撑能力之间的矛盾。计算方式如式(7)所示。

$$M_{VSID} = \sum_{i \in G_E} W_i (M_i - \bar{M})^2 \quad (7)$$

式中: G_E 为所有新能源机组集合; M_i 、 $\bar{M}$ 分别为机组 i 的 MRSCR 与系统 MRSCR 平均值; W_i 为机组 i 的弃风或弃光容量。

2.3 约束条件

异步联网高压直流送端系统在进行外送能力优化的过程时, 不仅需要系统运行的基本约束, 还需要保障送端系统的支撑能力等。

1) 节点电压 V_i 约束, 即:

$$V_{i \min} \leq V_i \leq V_{i \max} \quad (8)$$

式中 $V_{i\min}$ 、 $V_{i\max}$ 分别为系统节点 i 处的电压下限与上限。

2) 新能源并网点电压支撑能力 M_i 约束, 即

$$M_{\min} \leq M_i \quad (9)$$

式中 $M_{\min}$ 为当新能源并网点近区发生故障时新能源机组暂态过电压不越限的最低新能源短路比。

3) 系统频率支撑能力约束, 即当发生大规模直流闭锁故障时, 保障送端系统频率波动限制在允许的范围内, 防止发生新能源拖网进而造成连锁故障, 约束如式(10)所示。

$$f_N - f_{\min} \leq \Delta f_{\text{nadir}} \leq f_{\max} - f_N \quad (10)$$

式中: Δf_{nadir} 为直流闭锁后的最大暂态频率偏差; $f_{\min}$ 与 $f_{\max}$ 分别为系统的最小、最大频率约束; f_N 为电网额定频率。

4) 机组出力 P^i 约束, 即:

$$P_{\min}^i \leq P^i \leq P_{\max}^i \quad (11)$$

式中 $P_{\min}^i$ 、 $P_{\max}^i$ 分别为发电机组出力的下、上限。不同机组出力的上下限不同, 其中新能源机组出力的下限为 0, 为保证系统拥有足够的同步调频容量, 以最大容量有功功率波动故障即直流闭锁故障为约束, 依据当前直流外送情况设定各参与调频的同步机组的出力下限, 即:

$$\Delta P_{\max} = \sum_{i=1}^{N_S} P_{\text{Smin}}^i + \sum_{j=1}^{N_H} P_{\text{Hmin}}^j + \Delta P_{\text{load}} \quad (12)$$

式中: $\Delta P_{\max}$ 为最大有功波动功率; P_{Smin}^i 、 P_{Hmin}^j 分别为参与调频的不同水电、火电同步机组的最低出力; ΔP_{load} 为故障发生后负荷参与调频后所填补的有功盈余; N_S 、 N_H 分别为水、火电机组数量。

3 模型求解

3.1 模型求解流程

本文所研究的计及送端系统电压与频率支撑能力的电力系统运行方式优化调整属于非线性、多目标规划问题。为保证求解结果的准确和可信, 本文对所涉及的新能源并网点电压支撑能力等约束条件的计算利用调控方式部门广泛采用的 PSD 软件进行求解。因此, 为方便建模并满足与第三方应用软件的交互需要, 本文选择改进多目标粒子群优化算法进行优化主流程的建模, 即主问题; 主流程中所涉及的相关约束的计算与评估构成了子问题。

优化主流程结束后, 获得待决策问题的 Pareto

最优解集, 进一步采用变异系数法确定最优系统运行方式。模型完整求解流程如图 2 所示。

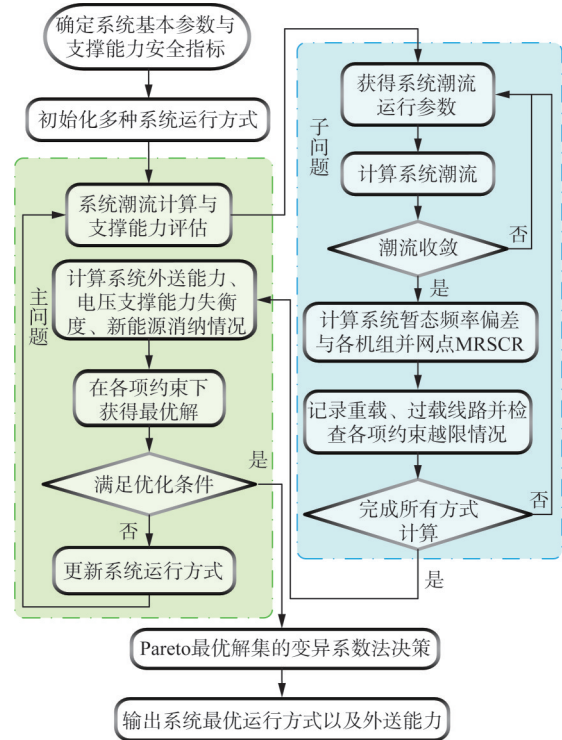


图 2 多目标直流外送能力优化问题求解流程

Fig. 2 Multi-objective DC external transmission capacity optimization problem solving process

3.2 模型求解方法

改进多目标粒子群算法(improved multi-objective particle swarm optimization, IMOPSO)具有高效的集群并行搜索能力和记忆功能、较好的收敛性及全局寻优能力^[26], 本文将其与 PSD 仿真相结合, 以各机组的出力为变量, 直流外送能力、新能源消纳能力和电压支撑能力失衡度为优化目标, 构建了基于 IMOPSO-PSD 的联合优化模型。

IMOPSO 与 PSO 算法的粒子更新方式相同, 依然是根据解空间中粒子自身和粒子群体的信息来决定粒子运动的速度和方向^[26], 具体如式(13)~(14)所示。相较 PSO 算法, IMOPSO 的主要改进在于通过引入惯性权重、优化个体最优值选取^[27]、采用交叉变异^[26]等措施对算法易陷入局部最优的缺陷加以抑制; 通过对约束的及时校验, 避免初始化和优化过程中出现不可行解。

$$v_{id}^{(k+1)} = wv_{id}^{(k)} + c_1r_1(p_{id}^{(k)} - x_{id}^{(k)}) + c_2r_2(g_d^{(k)} - x_{id}^{(k)}) \quad (13)$$

$$x_{id}^{(k+1)} = x_{id}^{(k)} + v_{id}^{(k+1)} \quad (14)$$

式中: $v_{id}^{(k)}$ 、 $x_{id}^{(k)}$ 为 k 轮中第 i 个粒子在第 d 维上的迭代的速度和步长; c_1 、 c_2 为加速因子; r_1 、 r_2 为 $(0, 1)$ 之间的随机数; $p_{id}^{(k)}$ 为第 i 个粒子在 k 时刻最优位置向量中的第 d 维分量; $g_d^{(k)}$ 为 k 时刻种群最优位置向量中的第 d 维分量。

PSD(power system department)软件是目前广泛应用于我国电力系统各大运行、研究、设计单位及部分高校的电力系统分析软件包集合, 其包含潮流计算程序(power system data-power flow, PSD-PF)、短路电程序(power system department-short circuit current program, PSD-SCCP)、暂稳程序(power system department-stability transient program, PSD-ST)等众多核心程序, 具有计算规模大、计算速度快、数值稳定性好、功能强等特点。在改进多目标粒子群算法的主问题求解框架下, 本文使用其中的 PF 与 SCCC 软件求解潮流和短路比等子问题。模型求解流程如图 3 所示。

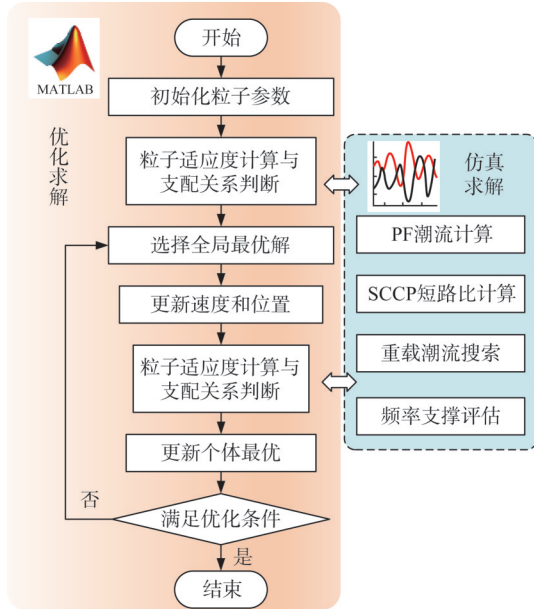


图3 IMOPSO-PSD联合优化模型

Fig. 3 IMOPSO-PSD joint optimization model

3.3 基于变系数法的直流外送优化运行方式决策

在求解目标的过程中, 当过于追求系统最大外送容量时会造成新能源消纳能力的降低, 这主要是因为受到线路潮流、网架结构等约束条件的制约; 同时, 新能源消纳能力也与系统电压支撑能力负相关, 所以为了获取最优运行方式, 采用根据评价指

标变异程度进行动态赋权的变异系数法确定最优解。

变异系数法是一种利用被评价对象指标的变异程度进行指标动态赋权的方法, 直接利用各指标值自身包含的量化信息进行权重计算, 最终决策过程更加客观^[28]。由于本次优化模型的核心目的是在改善系统支撑能力的前提下实现对送端系统外送能力与新能源消纳的共同优化, 因此本文选择直流外送能力、新能源消纳能力和电压支撑能力失衡度作为变异系数法的 3 个评估指标。决策过程简述如下^[29-30]。

1) 将最优解集中符合约束条件的所有系统运行方式 $c_1 \sim c_n$ 共 n 个方式构建成直流外送优化运行方式集合 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_i, \dots, c_n\}$ 。

2) 以直流外送能力 f_1 、新能源消纳能力 f_2 和电压支撑能力失衡度 f_3 构建评价指标集 $F = \{f_1, f_2, f_3\}$, 此时, 运行方式 c_i 的评价指标 f_j 的值表示为 A_{ij} 。

3) 构建决策矩阵 $A = [A_{ij}]_{n \times 3}$ 并依据式 (15) 进行归一化处理, 其中第 i 行 j 列元素的归一化值 $\bar{A}_{ij}$ 为:

$$\bar{A}_{ij} = \frac{A_{ij} - \min_{i \in n} A_{ij}}{\max_{i \in n} A_{ij} - \min_{i \in n} A_{ij}} \quad (15)$$

4) 首先, 根据式 (16) 求出评价指标 f_j 的变异系数 V_j 。随后, 采用式 (17) 求出该指标的权重 W_j 。其中, $\bar{A}_i$ 为矩阵 A 第 i 行所有元素的平均值。

$$V_j = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (A_{ij} - \bar{A}_i)^2}}{\bar{A}_i} \quad (16)$$

$$W_j = \frac{V_j}{\sum_{j=1}^3 V_j} \quad (17)$$

5) 以归一化处理的决策矩阵为基础, 将直流外送能力、新能源消纳能力指标与权重加权求和, 再与电压支撑能力失衡度指标的加权值求差, 获得方案的综合评价值。最终, 综合评价值最大的与运行方式为送端系统最优外送方案。

4 算例分析

4.1 大规模风、光并网的 IEEE 39 节点直流异步联网系统

为了说明所建模型的有效性, 本文采用如图 4 所示的改进 IEEE 39 节点系统进行仿真验证。在该系统中, G1—G14 均为风电机组, G15—G19 为光

伏机组，G20—G23 为水电机组，G24、GX 为火电机组(GX 作为平衡机组)。该系统通过一条直流输电线路与等值外部系统 R1 相连，为保证受端稳定且拥有足够的负荷缺额，将 R1 外部系统等值为无穷大系统，并在直流受端位置配置大负荷以模拟负荷中心的用电需求。系统内部交流总负荷量为 3 120.1 MW，新能源机组总装机容量 3 303 MW，同步机组总装机容量 3 230 MW。基准值容量 S_b 为 100 MVA，重载线路约束设定为额定值的 90 %。

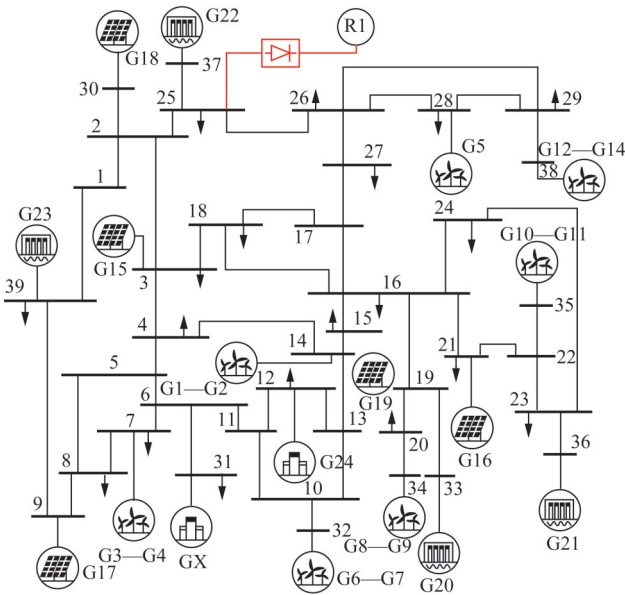


图 4 改进 IEEE 39 节点系统图

Fig. 4 Improved IEEE 39-node system diagram

4.2 结果分析

本文为对比在不同支撑能力约束情况下系统的外送能力优化情况、送端电网稳定性改善情况，分别构建了对比场景 1—3 进行分析；同时，为体现所建模型相较于其他优化算法的优势，本文依据文献[31]所提模型构建以新能源消纳量为优化目标的优化场景进行对比，各优化场景如下所示。

本文场景：以直流外送、新能源消纳和电压支撑能力失衡度为优化目标，在考虑出力上下限、节点电压和线路潮流等系统运行基本安全约束同时计及系统电压与频率支撑能力约束，即本文所提完整模型。

对比场景 1：在本文所提完整模型的基础上，松弛系统频率支撑能力约束，仅计及系统运行基本安全约束和电压支撑能力约束。

对比场景 2：在本文所提完整模型的基础上，

减小对电压支撑能力的约束，仅计及系统运行基本安全约束和频率支撑能力约束。

对比场景 3：在本文所提完整模型的基础上，同时减少电压支撑能力约束和松弛频率支撑能力约束，仅满足系统运行基本安全约束。

对比场景 4：采用文献[31]的方法，以新能源消纳量为单一优化目标，计及系统运行基本安全约束和电压支撑能力约束，不考虑频率支撑能力约束。

各场景系统模型参数如表 1 所示。

表 1 各场景模型参数

Tab. 1 Parameters of each scene model

序号	MRSCR 约束	频率偏差约束/Hz	潮流重载约束
本文场景	≥ 2	≤ 1	$\leq 90\%$
对比场景 1	≥ 2		$\leq 90\%$
对比场景 2	≥ 1.5	≤ 1	$\leq 90\%$
对比场景 3	≥ 1.5		$\leq 90\%$
对比场景 4	≥ 2		$\leq 90\%$

1) 增强支撑能力对外送与新能源消纳的影响

以图 4 中的异步直流外送系统为研究对象，分别对上述 5 种优化场景下的系统最优运行方式进行求解，各场景下最优运行方式的系统参数如表 2 所示。

表 2 各场景优化结果对比

Tab. 2 Comparison of optimization results for various scenarios

场景	直流外送 /MW	新能源消纳 /MW	电压支撑能力 失衡度	频率峰值 /Hz
本文场景	908.70	2 390.90	65.19	50.99
对比场景 1	1 088.70	2 352.50	72.94	51.28
对比场景 2	909.17	2 772.19	73.47	50.99
对比场景 3	1 197.79	2 758.73	64.10	51.56
对比场景 4	856.96	2 540.38	118.65	50.94

从整体上看，上述场景的电压支撑能力失衡度相较于文献[31]所提模型下的优化结果，均处于较低的水平；且本文所提模型频率峰值的估计值在约束范围内，均无重载线路出现，这说明了本文所提模型对于优化潮流分布、改善送端系统支撑能力、均衡新能源出力具有较好的效果。

从电压支撑能力对系统的影响角度来看，从本文场景与对比场景 1—3 中可以发现，在本优化模型框架中，相同 MRSCR 约束下系统的新能源消纳

能力基本不变。由此可以得出,MRSCR水平对于新能源机组的出力有着较强的影响能力,相应的,频率支撑能力对于外送能力的约束作用则转化为了对同步机组出力水平的约束,二者共同作用下便造成了本文场景中直流外送水平和新能源消纳水平均相对较低的现象。因此,本文综合电压与频率支撑能力约束,重点研究本文场景与对比场景3中本模型对系统运行方式的优化效果。

本文场景与对比场景3中系统各机组的出力水平如图5中曲线所示。图中绿色为机组出力下限,由于风、光机组不参与调频,因此机组下限为0;23号水电机组由于不参与调频,因此最小开机容量固定为100 MW。其余4台同步机组由式(12)确定其最低出力约束。

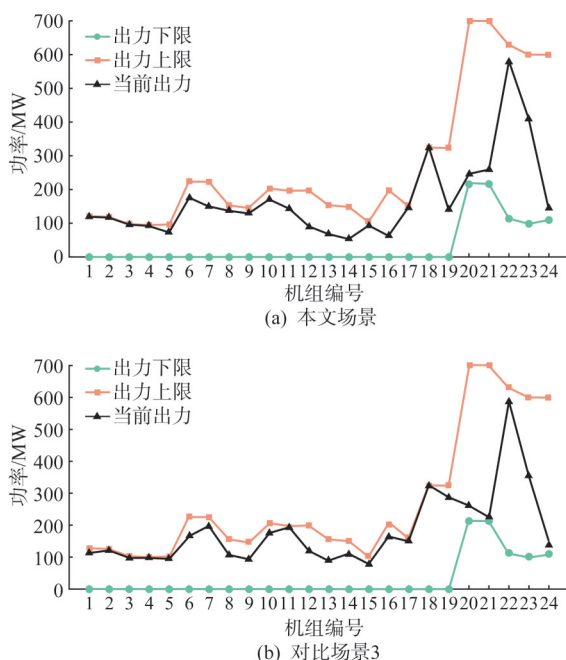


图5 本文场景与对比场景3中各机组出力

Fig. 5 Generator outputs in this paper scenario and comparison scenario 3

由图5可以看出,本文场景与对比场景3中所有机组均满足出力约束,且大部分机组接近出力上限。但个别如12—14、19号机组出力在两场景中出现了不同程度的削减,为进一步探究原因,给出系统MRSCR情况,如图6所示,1—19号为新能源机组。

从图6整体上看,对比场景3中大部分机组的出力都达到了装机容量的80%以上,而本文场景

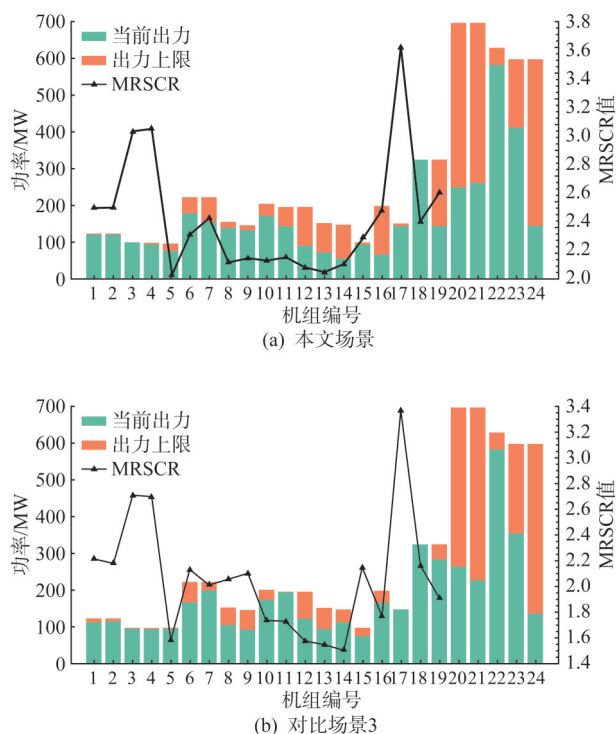


图6 本文场景与对比场景3中系统MRSCR水平

Fig. 6 System MRSCR level in this paper scenario and comparison scenario 3

则受限于MRSCR水平,部分机组出力水平较低;但相较于本文场景,对比场景3中的系统MRSCR水平存在多处支撑能力较为薄弱的地区。在所有机组中,12—14号机组由于场站MRSCR水平过低,上述场景中出力均受到了一定的限制;1—4、17—18号机组尽管处于电压支撑能力较强的区域,但机组均已接近出力上限,无法提供更多的功率;与之相反,6—7、16号机组的MRSCR裕度相对较大,出力却也受到了限制,特别是19号机组,两种场景下的出力存在较大变化,综合分析是由于潮流约束与频率约束叠加所导致的。如图7中所示,红色输电线路为对比场景3中超过80%负载的线路,可以看出,2—25、17—27、3—4等线路的容量严重限制了上述新能源机组的消纳。

2) 本文优化模型与其他优化算法的对比

根据表2所示的优化结果可以看出,由于文献[31]所提模型仅针对新能源消纳量单一目标进行优化,因此在相同短路比水平约束下,其新能源出力水平优化效果较为明显,但直流外送与电压支撑能力失衡度指标与本文方法的优化结果还存在一定差距,尤其是在当对比场景1中松弛频率约束后,相

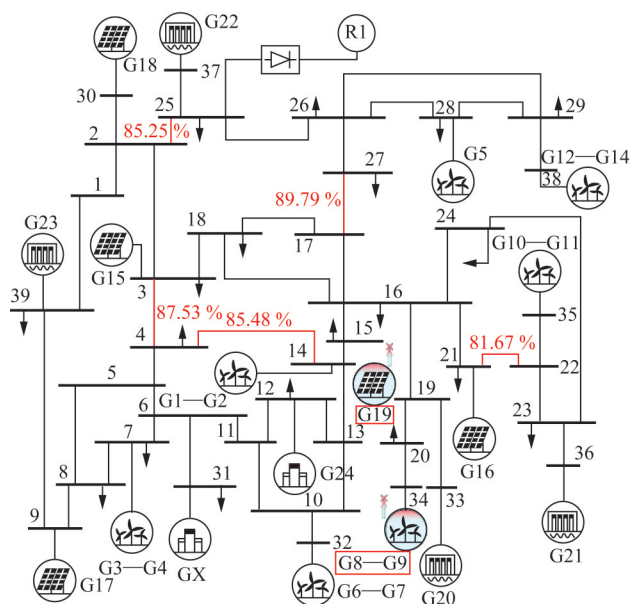


图7 对比场景3中系统线路重载情况

Fig. 7 System line heavy load conditions in comparison scenario 3

较于同样未对频率进行约束的对比场景4, 存在着明显的直流外送容量差距。

对比场景4中机组出力与MRSCR水平如图8所示。对比图6本文场景的MRSCR水平可以看出, 对比场景4仅以新能源消纳量为优化目标, 导致一半以上的新能源机组接入位置的MRSCR水平达到临界值, 这意味着此时系统电压支撑能力不足的潜在风险较为突出。此外, 对比场景4中的MRSCR峰值明显高于本文场景, 说明本文模型借助电压支撑能力失衡度这一优化目标的调控, 在一定程度上提高了电压支撑能力充足地区的新能源利用水平。

综上, 本模型能够在提升新能源消纳量的同时, 尽可能的保障外送容量与系统电压支撑能力的

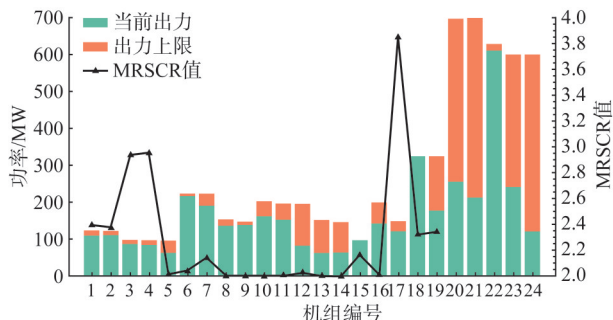


图8 对比场景4下机组出力与MRSCR水平

Fig. 8 Generator outputs and MRSCR level in comparison scenario 4

均衡程度, 平衡各项需求, 更符合高新能源占比的送端系统对于绿电外送与系统稳定的要求。

3) 基于系统支撑能力调整的外送优化对送端系统稳定性的影响

在上述研究结果中, 为了保障送端系统支撑能力水平, 牺牲了部分送端系统的外送能力以及新能源消纳容量。为证明该优化结果对于保障送端系统稳定性的重要作用, 针对上述具体优化结果进行暂态仿真验证, 探究送端系统稳定性的改善效果。

首先对上述运行方式下送端系统的频率稳定性进行测试。以最严重的功率波动——直流双极闭锁故障为突发情况, 本文场景与场景3中送端系统的频率波动对比如图9所示。

从整体上看, 本文模型中系统频率支撑能力对于暂态频率峰值的评估与基于PSD的仿真结果基本吻合; 本文场景在频率支撑能力的约束下, 保证了送端母线节点的最大暂态频率偏差不超过1 Hz。

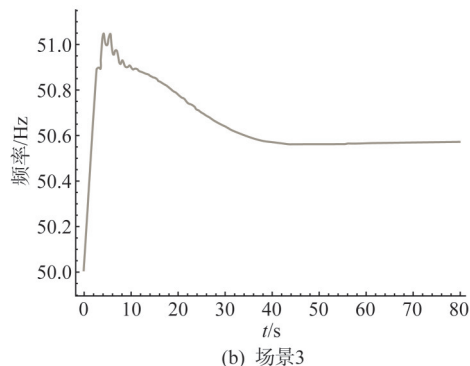
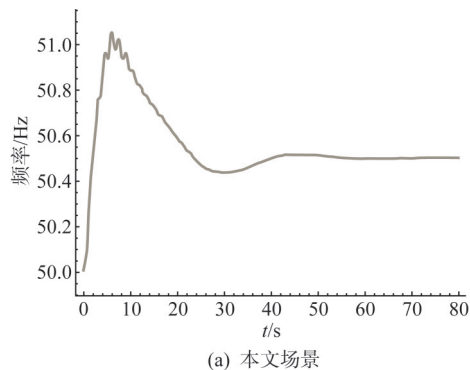


图9 本文场景与场景3中直流双极闭锁频率波动对比

Fig. 9 Comparison of DC bipolar blocking frequency fluctuations between this paper scenario and scenario 3

对于系统的电压稳定性, 重点针对支撑能力最薄弱的13号机组进行单相瞬时故障仿真, 本文场景与场景3下机端的暂态电压仿真如图10所示。

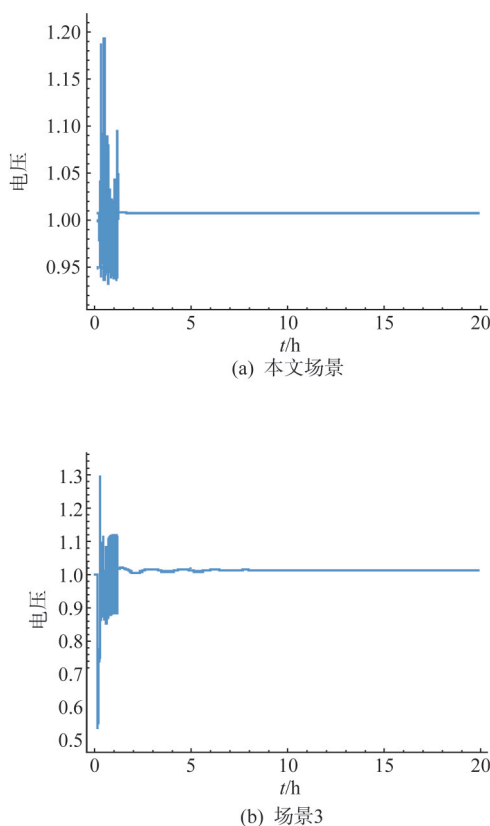


图 10 本文场景与场景 3 中单相瞬时故障机端电压波动对比

Fig. 10 Comparison of single-phase transient fault machine-end voltage fluctuations between this paper scenario and scenario 3

由上述仿真结果可以看出, 场景 3 中的电压波动更为剧烈, 且此时 13 号机组的暂态过电压峰值约为 1.3 p. u., 达到了国家标准规定的新能源高电压耐受能力上限, 存在机组脱网的风险; 而本文场景中, 机端暂态过电压则不足 1.2 p. u., 过电压水平相较场景 3 得到了一定程度的抑制。综上所述, 本文所建模型对于送端系统的电压与频率稳定问题都有较为明显的改善效果。

5 结论

本文针对高新能源占比的异步联网直流送端系统, 加入系统电压与频率支撑能力约束以改善送端系统的稳定性, 以系统的直流外送能力、新能源消纳能力和电压支撑能力失衡度为目标, 在 IMOPSO-PSD 联合优化的框架上构建了基于送端系统支撑能力优化的直流外送能力优化提升模型。通过搭建的高新能源占比 IEEE 39 节点异步直流送端

电网模型, 得到的结论如下。

1) 系统电压支撑能力约束对于送端的新能源消纳能力有着较强的约束作用, 决定着新能源机组的出力水平; 相应地, 频率支撑能力则制约着系统的同步机的出力。

2) 在计及支撑能力的约束后, 通过对重载潮流的限制以及电压支撑能力失衡度的调整, 在使送端系统的新能源机组得到更为充分利用的同时, 提高了送端系统整体的稳定性。

3) 在面对复杂的日益复杂的直流送端系统时, 相较于现有优化算法, 本模型能够在提升新能源消纳量的同时, 尽可能的保障外送容量与系统电压支撑能力的均衡程度, 平衡各项需求, 更符合高新能源占比的送端系统对于绿电外送与系统稳定的要求。

此外, 本文优化过程中所体现出的系统线路容量、新能源装机容量等限制外送能力与消纳能力进一步提升的因素, 可进一步应用于输电网优化与机组容量配置的规划研究中, 对优化送端系统具有一定程度的参考价值。

参考文献

- [1] 伍阳阳, 陈亦平, 李胜男, 等. 云南新能源高占比特性分析与 2025 年应对措施[J]. 云南电力技术, 2021, 49(5): 28-32. WU Yangyang, CHEN Yiping, LI Shengnan, et al. Analysis of the characteristics of high share of new energy in Yunnan and measures to cope with it in 2025 [J]. Yunnan Electric Power Technology, 2021, 49(5): 28-32.
- [2] 杨超. 异步联网下高压直流参与的系统恢复策略[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
- [3] 肖友强, 邓步青, 文云峰, 等. 计及送端电网频率稳定的直流联络线极限承载能力评估[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(2): 3-12. XIAO Youqiang, DENG Buqing, WEN Yunfeng, et al. Evaluation of the ultimate carrying capacity of DC contact line with frequency stability of the sending grid[J]. Journal of Power Science and Technology, 2021, 36(2): 3-12.
- [4] 吴林林, 李蕴红, 于思奇, 等. 基于短路比指标的风电汇集系统稳定性分析[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(8): 72-78. WU Linlin, LI Yunhong, YU Siqu, et al. Stability analysis of wind power aggregation system based on short circuit ratio index [J]. Power Automation Equipment, 2022, 42 (8): 72-78.
- [5] 刘其辉, 闫佳颖, 吴勇, 等. 计及锁相误差的双馈风电并网系统暂态过电压特性与抑制[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(11): 165-173. LIU Qihui, YAN Jiaying, WU Yong, et al. Characteristics and suppression of transient overvoltage for DFIG wind power grid-connected system considering phase locking error [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(11): 165-173.

- [6] 谢小荣, 贺静波, 毛航银, 等. “双高”电力系统稳定性的新问题及分类探讨[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 461–475.
XIE Xiaorong, HE Jingbo, MAO Hangyin, et al. New issues and classification of power system stability with high shares of renewables and power electronics [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 461–475.
- [7] 王云玲, 李婷, 杨伟峰, 等. 一种送端电网单回直流极限承载能力评估方法[J]. 电力建设, 2021, 42(11): 82–89.
WANG Yunling, LI Ting, YANG Weifeng, et al. A method for evaluating the ultimate carrying capacity of single-return DC at the sending end of the power grid [J]. Power Construction, 2021, 42(11): 82–89.
- [8] 尹纯亚, 李凤婷, 周识远, 等. 基于无功功率短路比的直流闭锁暂态过电压计算方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(10): 150–154, 161.
YIN Chunya, LI Fengting, ZHOU Zhiyuan, et al. DC blocking transient overvoltage calculation method based on reactive power short-circuit ratio [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(10): 150–154, 161.
- [9] 王姝彦, 徐式蕴, 孙华东, 等. 高比例电力电子电力系统过电压(三): 直流故障下新能源暂时工频过电压机理[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(8): 2990–3002.
WANG Shuyan, XU Shiyun, SUN Huadong, et al. High proportional power electronic power system overvoltage (3)-mechanism of new energy temporary frequency overvoltage under DC fault [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(8): 2990–3002.
- [10] 郑外生, 陈亦平, 周保荣, 等. 云南新型电力系统运行控制体系的构想[J]. 南方电网技术, 2022, 16(9): 83–89.9
ZHENG Waisheng, CHEN Yiping, ZHOU Baorong, et al. The concept of new power system operation control system in Yunnan [J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(9): 83–89.9
- [11] 陈义宣, 王国腾, 李玲芳, 等. 计及安全约束的多直流送出电网新能源极限渗透率估计方法[J]. 电力自动化设备, 2023, (9): 242–248.
CHEN Yixuan, WANG Guoteng, LI Lingfang, et al. Estimation of new energy limit penetration rate of multi-direct current (DC) transmission grid taking into account security and stability constraints [J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, (9): 242–248.
- [12] DAI H, ZHANG L, WEI Y, et al. Renewable energy power optimization control strategy based on online multiple renewable energy stations short-circuit ratio[C]//Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE), July 3–6, 2024, Chengdu, China. New York: IEEE, 2023: 2531–2535.
- [13] WANG Z, LI Qi, DONG Y, et al. Time series production simulation optimization method of renewable energy electrical power system considering msrcr constraints [C]//International Conference on Power and Energy Technology (ICPET), October 20–25, 2024, Beijing, China. New York: IEEE, 2022: 992–998.
- [14] 叶婧, 杨莉, 张磊, 等. 计及暂态频率稳定约束的同步惯量经济价值评估[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(8): 50–62.
YE Jing, YANG Li, ZHANG Lei, et al. Economic value assessment of synchronous inertia accounting for transient frequency stability constraints [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(8): 50–62.
- [15] 张红丽, 刘福锁, 吴雪莲, 等. 水电送电网直流承载能力评估及提升措施优化[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(21): 159–166.
ZHANG Hongli, LIU Fusuo, WU Xuelian, et al. Evaluation and improvement measures for optimization of DC carrying capacity in a hydropower sending power grid [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(21): 159–166.
- [16] 蔡葆锐, 曾丕江, 何金定, 等. 考虑频率安全约束的云南电网新能源运行边界研究[J]. 云南电力技术, 2021, 49(5): 17–22.
CAI Baorui, ZENG Pijiang, HE Jinding, et al. Study on the new energy operation boundary of Yunnan power grid considering frequency safety constraints [J]. Yunnan Electric Power Technology, 2021, 49(5): 17–22.
- [17] TAYLOR C W, BALU N J, MARATUKULAM D. Power system voltage stability [M]. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [18] 孙华东, 徐式蕴, 许涛, 等. 新能源多场站短路比定义及指标[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 497–506.
SUN Huadong, XU Shiyun, XU Tao, et al. Definition and index of short-circuit ratio of new energy multi-field stations [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 497–506.
- [19] 中国南方电网有限责任公司, 南方电网安全稳定计算分析导则: Q/CSG1107005—2022 [S]. 广东: 中国南方电网有限责任公司, 2022.
- [20] KUNDUR P, PASERBA J, AJJARAPU V, et al. Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(3): 1387–1401.
- [21] 贺海磊, 张彦涛, 孙晓强, 等. 考虑频率安全约束的西北电网新能源开发及直流外送规模评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(14): 4753–4762.
HE Hailei, ZHANG Yantao, SUN Xiaoqiang, et al. A method to evaluate the scale of new energy development and DC outgoing transmission in northwest power grid considering frequency safety constraints [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(14): 4753–4762.
- [22] 李世春, 田冰杰, 李惠子, 等. 基于频率安全约束与临界惯量计算的分时段限制风电出力方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(15): 60–71.
LI Shichun, TIAN Bingjie, LI Huizi, et al. Method for limiting wind power output in time periods based on frequency safety constraints and a critical inertia calculation [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(15): 60–71.
- [23] 樊艳芳, 钟显, 常喜强, 等. 频率的时空分布对低频减载的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 55–60.
FAN Yanfang, ZHONG Xian, CHANG Xiqiang, et al. Research of the UFLS under the frequency characteristics of temporal and spatial distribution [J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 55–60.
- [24] 于思奇, 孙大卫, 吴林林, 等. 新能源汇集系统短路故障清除后的暂态过电压机理[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(9): 179–185.
YU Siqi, SUN David, WU Linlin, et al. Transient overvoltage mechanism after short circuit fault removal of renewable energy collection system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(9): 179–185.
- [25] 陈兴华, 李峰, 陈睿, 等. 计及安全稳定二、三道防线的电网运行风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(4): 159

- 166.
CHEN Xinghua, LI Feng, CHEN Rui, et al. Risk assessment of power grid operation considering second and third defense line of security and stability [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(4): 159 - 166.
- [26] 吴小刚, 刘宗歧, 田立亭, 等. 基于改进多目标粒子群算法的配电网储能选址定容[J]. 电网技术, 2014, 38 (12): 3405 - 3411.
WU Xiaogang, LIU Zongqi, TIAN Liting, et al. Energy storage device locating and sizing for distribution network based on improved multi-objective particle swarm optimizer [J]. Power System Technology, 2014, 38 (12): 3405 - 3411.
- [27] 陶静, 徐武, 李逸琳, 等. 基于多目标算法的冷热电联供型综合能源系统运行优化[J]. 科学技术与工程, 2019, 19 (33): 200 - 205.
TAO Jing, XU Wu, LI Yilin, et al. Optimal operation of Integrated energy system combined cooling heating and power based on multi-objective algorithm [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19 (33): 200 - 205.
- [28] 张文朝, 顾雪平. 应用变异系数法和逼近理想解排序法的风电场综合评价[J]. 电网技术, 2014, 38(10): 2741 - 2746.
ZHANG Wenchao, GU Xueping. Comprehensive evaluation of wind farms using variation coefficient method and technique for order preference by similarity to ideal solution [J]. Power System Technology, 2014, 38(10): 2741 - 2746.
- [29] 刘艳, 季晨阳, 马艺瑄, 等. 基于生产可能性边界的含规模风电电力系统网架重构策略[J]. 电网技术, 2022, 46 (8): 2986 - 2998.
LIU Yan, JI Chenyang, MA Yixuan, et al. Production-possibility frontier-based network reconfiguration strategy for power system integrated with scaled wind farm [J]. Power System Technology, 2022, 46 (8): 2986 - 2998.
- [30] 陈正曦, 余轶, 梁才浩, 等. 全球能源互联网框架下的清洁能源多能互补协同开发[J]. 全球能源互联网, 2023, 6(2): 126 - 138.
CHEN Zhengxi, YU Yi, LIANG Caihao, et al. Coordinative development of multi clean energy complementation based on global energy interconnection [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2024, 18(6): 69 - 78.
- [31] 秦建茹, 李海波, 孙谊嫔, 等. 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[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51 (16): 127 - 135.
QIN Jianru, LI Haibo, SUN Yizhen, et al. Optimization method for minimum start-up mode of conventional units considering constraints on the maximum grid connection strength of new energy [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51 (16): 127 - 135.

收稿日期: 2024-03-19; 网络首发日期: 2025-01-30

作者简介:

张丹(1980), 男, 高级工程师, 硕士, 从事电网安全稳定分析与控制、网源协调管理工作, 13577000797@139.com;

付宇昂(1999), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析与控制, 784233864@qq.com;

刘艳(1973), 女, 教授, 博士, 研究方向为电力系统安全防护与恢复控制、智能技术在电力系统中的应用、主动配电网, 电气设备状态检修, y.liu@ncepu.edu.cn.

广 告

广东创成建设监理咨询有限公司 A2-A3
广东电网有限责任公司佛山供电局 A4-A5
中国能源建设集团广东火电工程有限公司 A6-A7
青岛汉缆股份有限公司 A8-A9

天生桥二级水力发电有限公司 A10
南方电网电力科技股份有限公司 A11
中天科技海缆股份有限公司 A12
九源云(广州)智能科技有限公司 A13