引用格式:刘自发,郑浩宇.综合考虑功角稳定性的输电网多目标规划研究[J].电力科学与技术学报,2025,40(6):1-11.
Citation: LIU Zifa, ZHENG Haoyu. Research on multi-objective planning of power transmission network considering power angle stability[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2025,40(6):1-11.

综合考虑功角稳定性的输电网多目标规划研究

刘自发,郑浩宇
(华北电力大学电气与电子工程学院,北京 102206)

摘 要:随着可再生能源在输电网中的渗透水平持续提升,新能源并网引发的机端负电阻效应不断增强,导致电力系统功角稳定性面临严峻挑战,制约新能源消纳能力。针对该问题,先建立包含传统发电机组、新能源接入节点及等效负荷网络的三元单端口耦合等值模型,系统分析多节点输电网的功角稳定特性;再区别于传统单机系统分析方法,提出适用于复杂电网结构的静态功角稳定裕度量化指标,有效表征系统运行边界,突破现有静态电压稳定指标非线性特征显著、难以适应电网规划优化需求的技术瓶颈;然后,提出基于改进型McCormick包络法的裕度指标线性化策略,通过融合ε约束理论与多目标混合整数规划方法,构建兼具经济性与稳定性的输电网扩展规划模型,并采用帕累托最优解集筛选机制,实现多目标协同优化,确保规划方案综合性能最优;最后,采用HRP-38高比例新能源电网规划案例进行仿真分析,验证所提模型的有效性与适用性。

关 键 词:输电网规划;ε约束法;静态功角稳定;多目标优化;新能源消纳。
DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2025.06.001 **中图分类号**:TM73 **文章编号**:1673-9140(2025)06-0001-11

Research on multi-objective planning of power transmission network considering power angle stability

LIU Zifa, ZHENG Haoyu
(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: With the continuous improvement of the penetration level of renewable energy in the power transmission network, the negative resistance effect of the unit side caused by the grid connection of new energy is significantly enhanced, which brings severe challenges to the power angle stability of the power system and then restricts the ability of new energy consumption. In this study, the power angle stability characteristics of multi-node power transmission networks are systematically analyzed by establishing a ternary single-port coupling equivalent model including traditional generator sets, new energy access nodes, and equivalent load networks. Different from the traditional stand-alone system analysis method, a static power angle stability margin quantification index suitable for complex power grid structures is innovatively proposed, which can effectively characterize the system operation boundary, tackling the bottleneck posed by the marked nonlinearity of existing static voltage stability indexes and their inadequacy for grid planning optimization. Then, a marginal index linearization strategy based on the improved McCormick envelope method is proposed. By integrating ε constraint theory and the multi-objective mixed integer programming method, a power transmission network expansion planning model with both economy and stability is constructed. In particular, the Pareto optimal solution set screening mechanism is used to realize multi-objective collaborative optimization to ensure the optimal comprehensive performance of the planning scheme. The HRP-38 high-proportion new energy grid planning case is verified, which fully proves the effectiveness and engineering applicability of the model.

Key words: power transmission network planning; ε constraint method; static power angle stability; multi-objective optimization; new energy consumption

收稿日期:2025-03-27;**修回日期**:2025-06-04
基金项目:国家自然科学基金(5237071105)
通信作者:郑浩宇(2001—),男,硕士研究生,主要从事输配电网规划方面的研究;E-mail:zhenghaoyu576428@163.com

作为电力系统的核心组成部分，输电网的稳定性和可靠性直接影响着电力系统的经济效能与安全水平。输电网不仅承担着电能从发电侧到用户侧的全环节传输职能，还通过多级网架结构实现发输配用电的有机衔接。随着“双碳”战略目标的推进与清洁能源装机占比的持续攀升，输电网规划面临新的技术挑战，特别是在系统优化领域，亟待突破规划精度与可靠性的关键瓶颈[1-3]。在电力装机整体增速趋缓的态势下，可再生能源新增装机呈现显著增长特征。统计数据显示，截至2022年末，中国发电装机总容量已突破25.6亿千瓦[4]；2023年，风电、光伏新增装机规划达到了160 GW的规模，预计全年新能源发电量将占社会用电总量的15.3%[5]。

新型电力系统呈现的"双高"特征（即可再生能源渗透率显著提升与电力电子装置大规模接入）正深刻改变着传统电网的潮流分布模式，其引发的系统动态特性变化已成为引发电网功角失稳现象的主要诱因。从空间分布维度看，可再生能源（如风电、光伏）的选址往往远离传统负荷中心，与燃煤、水电等同步机组的地理布局存在显著差异[6]。当新能源大规模替代常规同步机组时，其分散式接入模式将导致输电通道的功率流向发生重构，加剧关键断面潮流过载风险，直接威胁功角稳定边界。从动态交互维度看，新能源逆变器与邻近同步机组、直流输电设备的控制特性存在强耦合效应，可能引发次、超同步宽频振荡[7]，进一步放大功角失稳风险。研究表明，相较于系统惯性降低的影响，这种由新能源接入引起的潮流分布异动对功角稳定的威胁更具基础性和全局性——它不仅改变了静态稳定判据的数学表征，更要求重新构建电网的物理支撑体系。同时，静态功角稳定不足会严重制约电力系统的新能源消纳能力：输电通道因功角稳定极限约束无法满载运行，导致新能源富集区外送容量受限，被迫弃风弃光[8]。功角失稳还可能引发电压崩溃或宽频振荡，触发新能源机组保护脱网，形成“失稳-脱网-再失稳”的连锁反应。此外，为规避稳定风险，系统运行被迫预留更大裕度，限制新能源出力波动空间，而跨区输电通道的降容运行进一步阻碍了新能源大范围的互济消纳。更严峻的是，为弥补稳定性缺陷，新能源场站须额外配置调相机、储能等设备，这推高并网成本，抑制开发积极性。破解这一矛盾须通过输电网规划主动重塑系统稳定边界，如构建适应新能源布局的强网架、优化潮流分布等；同时，应协同配置灵活性资源，方能打破“稳定约束-消纳受限”的恶性循环，支撑新能源的高效消纳[9-10]。

输电网规划在此背景下显得尤为重要：必须通过前瞻性网架设计与资源优化配置，主动应对新能源带来的潮流分布挑战。这包括构建适应新能源地理分布的新型输电走廊、改善系统拓扑结构以适应新能源的冲击性接入等措施[11]。只有将功角稳定性深度融入电网规划决策，才能破解新能源并网引发的"空间错配-潮流畸变-稳定弱化"的连锁难题。

电力系统稳定分析技术历经多年发展，其理论体系日趋成熟，在运行优化领域展现出了显著工程价值[12-14]。随着新能源渗透率突破临界阈值，输电网功角稳定表现出动态特性复杂化、多时间尺度耦合等新特征。目前，在新能源主导型电网的功角失稳机理建模与量化评估方面的系统性研究尚显不足。文献[14]提出了统一表征电力系统静态功角稳定与静态电压稳定的电阻裕度指标，这一指标有助于更全面地评估电力系统的稳定性。但其仅考虑了传统机组间的功角耦合效应，忽视了新能源接入产生的端口负电阻效应的影响。现有研究在解析新型电力系统稳定性演变规律时，对“双高”特征与静态功角稳定域的耦合作用机理尚未形成系统性认知框架。研究表明，新能源机组与同步机组的动态耦合作用将重构系统惯量分布特征，由此衍生的多频段振荡现象已成为制约电网稳定运行的重要技术瓶颈。其典型问题表现为变流器并网装置与电网阻抗间的多尺度交互影响，其引发的宽频域振荡特性显著区别于传统机电暂态失稳模式[15-17]。目前，文献[12, 18]对考虑电压稳定性的新能源接入的电网规划进行了分析，但这两篇文献均未量化负电阻效应的影响。目前，考虑新能源接入情况下的输电网功角稳定规划的研究鲜见。

本文先基于戴维南等效原理，构建电力传输网络的静态功角稳定性分析模型，通过建立单节点功角耦合等效电路模型，结合线路阻抗裕度参数并计及新能源并网引发的负阻抗效应，建立适应新型电力系统的静态功角稳定性综合评价体系；再在电网规划模型中引入该稳定性判据，运用ε约束优化理论，将原始规划问题重构为含整数变量的多目标优化模型；然后，通过ε约束算法求解获得规划方案的解集，形成兼顾经济性与稳定性的输电网架规划帕累托最优前沿；最后，采用HRP-38高比例新能源电网规划案例进行仿真分析，验证所提模型的有效性与适用性。

1　新能源接入后对区域功角稳定影响分析

传统电力系统静态功角稳定分析一般仅考虑新能源接入系统带来的有功潮流的改变，而忽略了新能源接入在电路结构上带来的影响。本文针对新能源接入后电力系统等值节点电路结构发生的改变进行研究。先给出新能源集中接入系统结构及等效电路（图 1），在新能源机组运行于最大功率跟踪模式时，其有功出力特性可表征为等效负电阻参数 R_w[19]，即

$$R_w=\frac{U_w^2}{P_w} \tag{1}$$

式中，U_w 为新能源并网母线电压；P_w 为新能源输出的有功功率。

基于建模假设，忽略输电线路与变压器绕组电阻效应，针对含高渗透率新能源发电的电力系统，构建火电机组节点等效模型，该节点新能源接入系统等值电路模型如图 1 所示。

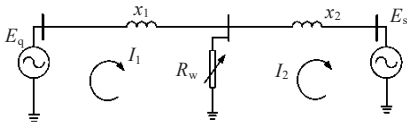

图 1　节点新能源接入系统等值电路模型

Figure 1　Equivalent circuit model of node's new energy access system

在图 1 中，E_q 为同步发电机端电压；E_s 为受端无穷大系统电压幅值；x_1、x_2 分别为火电机组至公共连接点以及并网母线至主系统的等效电抗参数；I_1、I_2 均为回路电流。

新能源并网前区域同步机组的电磁功率特性可表征为功角函数关系，即

$$P_e=\frac{E_qE_s}{x_1+x_2}\sin\delta \tag{2}$$

式中，δ 为机电暂态过程中发电机内电势与受端电压矢量的相对功角；P_e 为传统机组电磁功率。

结合直流潮流建模理论与输电网节点耦合特性分析，基于文献[20]提出的方法，构建单端口功角等值电路模型，即

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{P}_L\\ \boldsymbol{P}_G\end{bmatrix}=\boldsymbol{B}\begin{bmatrix}\boldsymbol{\theta}_L\\ \boldsymbol{\theta}_G\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{B}_{LL} & \boldsymbol{B}_{LG}\\ \boldsymbol{B}_{GL} & \boldsymbol{B}_{GG}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\boldsymbol{\theta}_L\\ \boldsymbol{\theta}_G\end{bmatrix} \tag{3}$$

式中，$\boldsymbol{P}_L$、$\boldsymbol{P}_G$ 分别为传统机组节点、仅含新能源机组节点的功率列向量；$\boldsymbol{B}$ 为电网节点导纳矩阵，；$\boldsymbol{\theta}_L$，$\boldsymbol{\theta}_G$ 分别为火力机组节点、新能源机组节点的节点功角列向量；$\boldsymbol{B}_{LL}$、$\boldsymbol{B}_{LG}$、$\boldsymbol{B}_{GL}$、$\boldsymbol{B}_{GG}$ 均为 $\boldsymbol{B}$ 的分块矩阵。

根据式（3），火力机组节点的功率列向量为

$$\begin{cases}\boldsymbol{\theta}_L=\boldsymbol{K}\boldsymbol{\theta}_G-\boldsymbol{X}_{LL}\boldsymbol{P}_L\\ \boldsymbol{X}_{LL}=\boldsymbol{B}_{LL}^{-1}\\ \boldsymbol{K}=-\boldsymbol{X}_{LL}\boldsymbol{B}_{LG}\end{cases} \tag{4}$$

令 $P_{eq,i}$ 为系统中新能源机组节点作用于节点 i 的功率耦合效应；$P_{coupled,i}$ 为除 i 节点外火电机组对节点 i 的功率耦合效应，则有

$$\begin{cases}P_{eq,i}=(\boldsymbol{K}\boldsymbol{\theta}_G)_i\\ P_{coupled,i}=\sum\limits_{j=1,i\neq j}^{n}X_{LL,ij}P_{L,j}\end{cases} \tag{5}$$

式中，$(\boldsymbol{K}\boldsymbol{\theta}_G)_i$ 为中间变量与包含新能源机组节点 i 的功角的乘积；$X_{LL,ij}$ 为矩阵 $\boldsymbol{X}_{LL}$ 的对角元素，其可表征该节点的自阻抗特性；$P_{L,j}$ 为节点 i 的有功功率。

根据式（5），可推出

$$\theta_{L,i}=P_{eq,i}-X_{LL,ii}P_{L,i}-P_{coupled,i} \tag{6}$$

式中，$\theta_{L,i}$ 为节点 i 的相角变量。

理论推导表明，该模型完整计及了同步机组节点与新能源节点之间的电磁耦合作用对节点功角特性的综合影响，表征了节点 i 与系统耦合电源间的等效阻抗路径。

当新能源以负阻抗形式接入系统时，会抵消系统的自然阻尼，也会改变传统机组的单端口接入特性，进而改变传统机组的电磁功率特性。因此，应对功角方程进行修改，令 Z_{11} 为传统火电机组自阻抗参数，Z_{12} 为机组与受端系统的互阻抗参数。基于二端口网络理论框架，结合网络方程，建立阻抗参数解析表达式：

$$\begin{cases}Z_{11}=\mathrm{j}x_1+(-R_w)//\mathrm{j}x_2=|Z_{11}|\angle\pi-\alpha_{11}\\ Z_{12}=\mathrm{j}(x_1+x_2)+\dfrac{\mathrm{j}x_1\cdot\mathrm{j}x_2}{-R_w}=|Z_{12}|\angle\boldsymbol{\pi}-\alpha_{12}\end{cases} \tag{7}$$

式中，α_{11}、α_{12} 分别为节点自阻抗相位特性与互阻抗相位特性。

联立式（6）、（7），可得输电网火电机群节点的电磁功率-功角特性解析式，即

$$\begin{cases}P_e=E_q^2G_{11}+\dfrac{E_qE_s}{|Z_{12}|}\sin(\delta-\alpha_{12})\\ G_{11}=\dfrac{\sin\alpha_{11}}{|Z_{11}|}\end{cases} \tag{8}$$

令 $G_w=1/R_w$，$B_1=1/x_1$，$B_2=1/x_2$；则可推导出 G_{11} 与 Z_{12} 表达式，即

$$\begin{cases} G_{11}=\dfrac{-G_{\mathrm{w}}B_1^2}{G_{\mathrm{w}}^2+\left(B_1+B_2\right)^2} \\ Z_{12}=\mathrm{j}(x_1+x_2)+x_1x_2G_{\mathrm{w}} \end{cases} \tag{9}$$

由推导可知，在考虑新能源接入的情况下，系统的传统机组静态功角稳定性不仅由机组出力P_{e}决定，还同时受到新能源出力G_{w}与线路拓扑结构B_2的影响。规模较大的新能源接入容易导致系统传统机组的静态功角稳定指标较差，直接威胁功角稳定边界。当系统处于功角稳定裕度较差的情况时，其会严重制约电力系统的新能源消纳能力：输电通道的功角稳定极限约束导致系统无法满载运行，进而使新能源富集区外送容量受限。为此，亟待提出综合考虑多方面因素的输电网规划方案，改变系统线路拓扑结构B_2，兼顾系统功角稳定性与经济性。

2 单端口耦合静态功角稳定指标

结合式(8)、(9)，可推导得处系统节点传统机组功角稳定指标γ，即

$$\gamma=\sin(\delta-\alpha_{12})=\frac{|Z_{12}|}{E_{\mathrm{q}}E_{\mathrm{s}}}\left(P_{\mathrm{e}}-E_{\mathrm{q}}^2G_{11}\right) \tag{10}$$

在直流潮流中，取E_{q}、E_{s}的标幺值为1。考虑$x_1+x_2\gg x_1x_2G_{\mathrm{w}}$，故可将式(10)近似为

$$\begin{cases} \gamma=(x_1+x_2+x_1x_2G_{\mathrm{w}})(P_{\mathrm{e}}-G_{11})=\gamma_1-\gamma_2 \\ \gamma_1=(x_1+x_2+x_1x_2G_{\mathrm{w}})P_{\mathrm{e}} \\ \gamma_2=(x_1+x_2+x_1x_2G_{\mathrm{w}})G_{11}= \\ \dfrac{-G_{\mathrm{w}}B_1(B_1+B_2+G_{\mathrm{w}})}{B_2\left[G_{\mathrm{w}}^2+\left(B_1+B_2\right)^2\right]} \end{cases} \tag{11}$$

式中，γ_1为表征火电机组出力对功角稳定性的影响的变量；γ_2为表征新能源接入对功角稳定性的影响的部分的变量。

从式(10)中可以看出，作为系统节点传统机组功角稳定指标，γ可描述系统功角稳定性。但从式(11)中也可以看出，该指标计算复杂，且含有大量非线性项，无法直接用于线性规划中，应先对其进行简化与线性化处理，将该指标转化为混合整数线性规划(mixed-integer linear programming, MILP)的目标函数。因此，对静态功角稳定指标进行线性近似化处理。

γ的计算涉及x_2的计算，即传统机组节点自阻抗的计算。但在输电网规划过程中，输电网的拓扑结构即线路结构处于不确定状态，而自阻抗的计算须对系统导纳矩阵求逆得到，该计算具有极强的非线性，在线性规划中求解耗时长且极可能无解。为此，对x_2的计算进行线性化处理。在输电网系统中，与网络阻抗矩阵的对角元素的值相比，网络阻抗矩阵的非对角元素的值可忽略不计，故根据文献[21]，可得到系统在拓扑结构不确定情况下的短路电流系数的简化线性表达式：

$$\frac{1}{x_2}=I_i^{\mathrm{SC}}=\frac{1}{X_{\mathrm{hh}}^{\mathrm{old}}}+\sum_{i\in I_{\mathrm{ih}}}\frac{1}{X_{\mathrm{c}}^i}m_k \tag{12}$$

式中，$X_{\mathrm{hh}}^{\mathrm{old}}$为未进行输电网扩建前该节点现存线路的节点自阻抗；$X_{\mathrm{c}}^i$为待选扩建线路阻抗；$m_k$为表征与该节点连接的编号为$k$的线路是否扩建的布尔变量；$I_i^{\mathrm{SC}}$为节点$i$的短路电流水平；$I_{\mathrm{ih}}$为待选线路中与节点$i$相连接的节点集合。

可通过式(12)的非线性约束求解出自阻抗。实际上，x_2为连续变量，$I_{\mathrm{ih}}^{\mathrm{SC}}$仅包含布尔变量，故可通过引入辅助变量，将这二者的乘积线性化，也就实现了将非线性约束线性化，最终求得x_2。

在式(11)中，γ_1与γ_2的计算均涉及多个连续变量的乘积，这在MILP中会带来非线性计算，导致计算时长的大幅增加，甚至可能无法求解；且连续变量之间的乘积无法通过引入辅助变量与约束来进行线性化。本文采用McCormick包络将非凸问题松弛为凸问题[22]。McCormick包络是一种用于双线性非线性规划问题的凸松弛方法。在非凸优化问题的求解过程中，通过求解该松弛问题并验证解的可行性，可同步获得原问题的上界估计值，从而建立完整的对偶估计框架。如处理双线性项$z=xy$。其中，$x\in\left[x^{\mathrm{L}},x^{\mathrm{U}}\right]$，$y\in\left[y^{\mathrm{L}},y^{\mathrm{U}}\right]$。其核心思想是通过线性不等式构造$z$的上、下界，形成凸松弛。这些边界分别为

$$\begin{cases} z\geqslant x^{\mathrm{L}}y+xy^{\mathrm{L}}-x^{\mathrm{L}}y^{\mathrm{L}} \\ z\geqslant x^{\mathrm{U}}y+xy^{\mathrm{U}}-x^{\mathrm{U}}y^{\mathrm{U}} \\ z\leqslant x^{\mathrm{U}}y+xy^{\mathrm{L}}-x^{\mathrm{U}}y^{\mathrm{U}} \\ z\geqslant x^{\mathrm{L}}y+xy^{\mathrm{U}}-x^{\mathrm{L}}y^{\mathrm{U}} \end{cases} \tag{13}$$

针对式(11)存在的双线性项，x_2的上限取为计划投入线路全部搭建时的节点自阻抗，其下限则取为原始网络的节点自阻抗。在McCormick包络中，B_2为x_2的倒数，可通过线性约束与松弛变量进行线性化。故B_2的上限对应x_2的下限，B_2的下限对应x_2的上限，P_{E}的上、下限分别对应传统机组的出力上、下限。

γ_2的计算涉及多个连续变量的相乘与相除运算，现有手段难以对其进行线性化。由于有$G_{\mathrm{w}}(B_1+B_2)\ll G_{\mathrm{w}}^2+(B_1+B_2)^2$，故对其进行简化近似，即

$$\gamma_2=\frac{G_{\mathrm{w}}B_1(B_1+B_2+G_{\mathrm{w}})}{B_2\left[G_{\mathrm{w}}^2+(B_1+B_2)^2\right]}\approx \frac{G_{\mathrm{w}}B_1(B_1+B_2+G_{\mathrm{w}})}{B_2\left[G_{\mathrm{w}}^2+2G_{\mathrm{w}}(B_1+B_2)+(B_1+B_2)^2\right]}= \frac{G_{\mathrm{w}}B_1}{B_2(B_1+B_2+G_{\mathrm{w}})} \tag{14}$$

简化后，通过引入辅助变量，约束将式中分母的倒数化为线性连续变量，并通过McCormick包络求解，即可将γ_2转化为线性连续变量。至此，完成对系统节点传统机组功角稳定指标γ的线性化与简化，可将其代入MILP中求解。

3　考虑静态功角稳定的输电网多目标规划模型

本研究针对高渗透率可再生能源并网背景下输电网规划的技术经济性平衡难题，构建计及同步机组功角稳定裕度的扩展规划模型。通过建立包含全生命周期建设成本、运行维护费用及静态稳定裕度的多维评价体系，提出融合经济性与稳定性的双目标协同优化框架。该模型突破传统单目标规划范式，采用多维度约束耦合方法实现对电网扩建方案的技术经济性综合评估。

3.1　规划模型目标函数

3.1.1　输电网扩建经济性

输电网规划的总成本包括输电线路投资成本和运行成本，计及全生命周期成本要素，其目标函数C为

$$\min C=C_{\mathrm{Inv}}+\sigma(C_{\mathrm{Gen}}+C_{\mathrm{Cur}}) \tag{15}$$

式中，C_{Inv}为待选线路投建所花费用；C_{Gen}为煤气机组日常发电的费用；C_{Cur}为新能源弃置所花费用；σ为等年值运行成本与投资成本之间的等值关系的系数。

则待选线路投建所需费用为

$$\begin{cases} C_{\mathrm{Inv}}=\sum\limits_{k\in N}\zeta c_k^{\mathrm{L}}m_k \\ \zeta=\dfrac{a(1+a)^b}{(1+a)^b-1} \end{cases} \tag{16}$$

式中，N为待选投建线路集合；c_k^{L}为第条k线路建设成本；m_k为决定第k条线路是否投建的0-1变量（若$m_k=1$，第k条线路投建；否则，若$m_k=0$，则第k条线路不投建）；ζ为线路资金回收系数；a、b分别为贴现率与使用年限。

煤气机组日常发电的费用为

$$G_{\mathrm{Gen}}=\sum_{g\in G}\left(a_g+b_gP_g^{\mathrm{G}}\right) \tag{17}$$

式中，G为传统发电机合集；a_{g}为发电机g的固定成本；b_g为发电机g的成本耗量特性系数；P_g^{G}为发电机g的发电功率。

新能源外送受限于输电线路的传输容量。当新能源的输送功率超过线路的传输极限时，线路会因过载而发生弃风弃光现象[23]。基于输电线路传输容量的限制，可推导出弃风弃光损失C_{cur}，即

$$C_{\mathrm{cur}}=c_{\mathrm{w}}E_{\mathrm{WAP}}= \begin{cases} c_{\mathrm{w}}\sum\limits_{s=1}^{n}\Delta t_s\left(P_{\mathrm{w},s}(t)-P_{\mathrm{T}}\right), & P_{\mathrm{T}}<P_{\mathrm{wi,max}} \\ 0, & P_{\mathrm{T}}\geqslant P_{\mathrm{wi,max}} \end{cases} \tag{18}$$

式中，c_{w}为新能源上网电价；E_{WAP}为弃置新能源所导致的电能损失；$P_{\mathrm{w},s}(t)$为各场景下新能源出力在第s场景的t时刻的新能源出力值；P_{T}为线路最大传输容量；Δt_s为第s场景的持续时间；$P_{\mathrm{wi,max}}$为新能源出力最大值；n为场景数。

3.1.2　静态功角稳定性

根据文3.1推导可知，指标γ可作为系统各个含传统火电机组节点静态功角稳定指标。但γ可能为正或负，不利于直接比较，故采用由其得到节点i的静态功角稳定裕度μ_i，即

$$\mu_i=\sqrt{1-\gamma_i^2} \tag{19}$$

显然，$0\leqslant\mu_i\leqslant1$。节点$i$的静态功角稳定裕度$\mu_i$越大，该节点$i$的功角越稳定；反之，节点$i$的静态功角稳定裕度$\mu_i$越小，则该节点$i$的功角越不稳定。在系统中，静态功角裕度的最小值决定系统功角稳定整体水平，故取功角裕度最小值作为系统静态功角裕度，即

$$\mu_{\mathrm{all}}=\min_i\left\{\mu_i\right\},i\in N_{\mathrm{g}} \tag{20}$$

式中，μ_{all}为系统静态功角裕度；N_{g}为含有火力机组的节点合集。

3.2　优化模型约束条件

基于MILP，构建直流潮流约束体系，对既有输电走廊，其运行应满足约束：

$$f_{ij}=b_{ij}\left(\theta_i-\theta_j\right) \tag{21}$$

式中，f_{ij}为节点i、j间线路传输功率；b_{ij}为节点i、j间

线路并联电纳；θ_i和θ_j分别为节点i、j的电压相角。

针对待扩建线路，引入0-1投建决策变量m_k，若线路投建，则线路传输功率为$f_{ij,k}$；否则，该线路潮流传输为零，即

$$f_{ij,k}=m_k b_{ij,k}\left(\theta_i-\theta_j\right) \tag{22}$$

式中，$f_{ij,k}$为节点i、j间第k条待选线路的传输功率；$b_{ij,k}$为节点i、j间第k条待选线路的电纳；m_k为第k条待选线路是否投建的布尔变量。

线路的潮流容量约束为

$$-F_{\mathrm{o,min}}\leqslant f_{\mathrm{o}}\leqslant F_{\mathrm{o,max}} \tag{23}$$

式中，f_{o}为已有线路与待选线路的传输功率合集列向量；$F_{\mathrm{o,min}}$、$F_{\mathrm{o,max}}$分别为线路最小、最大传输功率。

节点电压相角约束为

$$\theta_{\min}\leqslant\theta_i\leqslant\theta_{\max} \tag{24}$$

式中，θ_i为第i个节点电压相角；$\theta_{\min}$、$\theta_{\max}$分别为节点电压相角的最小值和最大值。

节点功率平衡约束为

$$\sum_{a\in G_i}P_{i,a}^{\mathrm{G}}+\sum_{b\in W_i}P_{i,b}^{\mathrm{W}}-R_i^{\mathrm{W}}+\sum_{j\in\Omega_{\mathrm{rec}}(i)}\sum_{ij,k}f_{ij,k}+\sum_{j\in\Omega_{\mathrm{rec}}(i)}f_{ij}=\sum_{c\in D_i}P_{i,d}^{\mathrm{D}}-R_i^{\mathrm{D}} \tag{25}$$

式中，$P_{i,a}^{\mathrm{G}}$为与节点i连接的火电机组a的输出功率；$P_{i,b}^{\mathrm{W}}$为与节点i连接的风电机组b的输出功率；G_i、W_i和D_i分别为与节点i连接的火电机组、风电机组和负荷的集合；$\Omega_{\mathrm{rec}}(i)$为与节点i连接线路集合；f_{ij}，$f_{ij,k}$规定以流入节点方向为正，$P_{i,d}^{\mathrm{D}}$为与节点i连接的负荷d的需求功率；R_i^{W}为节点i的弃风弃光量；R_i^{D}为切除负荷值。

发电机组出力上、下限约束为

$$P_{i,g,\min}^{\mathrm{G}}\leqslant P_{i,g}^{\mathrm{G}}\leqslant P_{i,g,\max}^{\mathrm{G}} \tag{26}$$

式中，$P_{i,g}^{\mathrm{G}}$为火力机组节点出力功率；$P_{i,g,\max}^{\mathrm{G}}$、$P_{i,g,\min}^{\mathrm{G}}$分别为$P_{i,g}^{\mathrm{G}}$的最大值和最小值。

在特定情形下，适度地切除负荷对保障系统安全、实现经济运行具有积极作用。但电网公司作为社会服务主体，不能仅从经济角度出发，应将保障社会用电需求放在首位，尽可能减少切负荷量。以满足节点切负荷的约束条件为

$$0\leqslant R_i^{\mathrm{D}}\leqslant r_{\mathrm{D}}\sum_{d\in D_i}P_{i,d}^{\mathrm{D}} \tag{27}$$

式中，r_{D}为节点i所允许的切负荷比例最大值。

4 多目标求解策略

传统线性加权法[24]等标量化方法存在主观偏好嵌入风险，而遗传算法[25]、粒子群优化[26]等启发式智能算法难以确保解集的收敛性与分布性。为此，本研究构建基于ε约束方法的MILP模型，提出具有全局寻优特性的帕累托解集生成机制。

ε约束法通过利用ε参数来实现多维目标协同优化。具体而言，将全生命周期经济成本$F_1(x)$定义为主优化目标，将系统静态功角稳定裕度$F_2(x)$转化为ε约束条件，定义4个边界值为

$$\begin{cases}F_{1\min}(x)=\min F_1(x)\\F_{2\min}(x)=\left\{F_2(x):F_1(x)=F_{1\min}(x)\right\}\\F_{2\max}(x)=\max F_2(x)\\F_{1\max}(x)=\left\{F_1(x):F_2(x)=F_{2\min}(x)\right\}\end{cases} \tag{28}$$

在式(28)中，先以$F_1(x)$为目标函数进行单目标优化，得出此时的目标函数最小值$F_{1\min}(x)$；再将$F_1(x)=F_{1\min}(x)$作为约束条件加入优化模型，以$F_2(x)$为目标函数，求得解为$F_{2\min}(x)$；最后，以$F_2(x)$的负值为目标函数，求解得出解为$F_{2\max}(x)$，将$F_2(x)=F_{2\max}(x)$作为约束条件加入优化模型，以$F_1(x)$为目标函数，求得解为$F_{1\max}(x)$。

通过建立主导目标函数$F_1(x)$的极值化模型，将辅助目标$F_2(x)$转化为ε参数化约束条件，形成具有松弛边界的MILP模型。采用参数动态调整机制，通过ε值的渐进式松弛实现经济性目标与稳定裕度的动态均衡，从而生成具有非支配特性的帕累托前沿解集，即

$$\begin{cases}\min F_1(x)=C\\F_2(x)\leqslant\varepsilon\\\varepsilon=F_{2\min}(x)+\dfrac{F_{2\max}(x)-F_{2\min}(x)}{N}\delta,\delta=1,2,\cdots,N\\\text{s.t.}\begin{cases}g(x)\leqslant 0\\h(x)=0\end{cases}\end{cases} \tag{29}$$

式中，ε为ε约束参数；N为仿真段数；δ为分段系数；C为所设置的模型求解目标函数；$g(x)$为不等式约束；$h(x)$为等式约束。

定义相对经济性与相对系统稳定性为

$$\begin{cases}\tilde{F}_1(x)=\dfrac{F_1(x)}{F_{1\min}(x)},F_1(x)>0\\\tilde{F}_2(x)=\dfrac{F_2(x)}{F_{2\min}(x)},F_2(x)<0\end{cases} \tag{30}$$

式中,$\tilde{F}_1(x)$为相对经济性;$\tilde{F}_2(x)$为相对系统稳定性。

同时,求得以下4个特殊点:

$$\begin{cases} F_1^{\Delta}=(1,1) \\ F_2^{\Delta}=\left(\dfrac{F_{1\max}(x)}{F_{1\min}(x)},\dfrac{F_{2\max}(x)}{F_{2\min}(x)}\right) \\ F_1^{\nabla}=\left(1,\dfrac{F_{2\max}(x)}{F_{2\min}(x)}\right) \\ F_2^{\nabla}=\left(\dfrac{F_{1\max}(x)}{F_{1\min}(x)},1\right) \end{cases} \tag{31}$$

式中,点F_1^{Δ}为经济性与稳定性都取得最优解的理想点;点F_1^{∇}为经济性最优而稳定性最差的边界点;点F_2^{Δ}为稳定性与经济性都最差的优化边界点;点F_2^{∇}为经济性最差而稳定性最优的边界点。

该寻优过程本质上是从边界点F_2^{∇}向边界点F_1^{∇}推进。在这一过程中,F_1^{Δ}点被视为ε约束法寻优的最理想目标。通过量化和比较各运行点与目标F_1^{Δ}点的距离,将距离最小的运行点确定为输电网最佳规划策略。最理想点对应着各目标函数独立优化的最优解,故该最佳规划策略能实现多目标函数的综合最优。

5　算例分析

5.1　算例参数

本文算例采用HRP-38电力规划测试系统[21],验证所提策略的可行性与有效性。该算例系统基于中国西北电力系统实际数据。HRP-38测试系统电路结构如图2所示。从图2中可以看出,其分为D1~D5这5个区域,每个区域具有不同的拓扑特征。D1中现有的网架结构为区域内无环的放射状网络。D2中的骨干网络将所有总线连接成一个分支,使其成为一个链状网络。D2和D3形成一个完整的回路。D3有11个节点,是这5个区域中节点数目最多的区域。此外,该测试系统电路连接相对复杂,包含2个局部环和3个外部连接的分支。其中,D4和D5中的网格均为环网。该系统包含38条总线。其中,2条为隔离总线。该系统总装机容量为328.6 GW,共有发电机143台。其中,57台发电机为常规火电发电机,其他发电机为风力与光伏发电机。系统新能源渗透率远超50%。该网络有102个分支机构。候选支路集合包含88条交流支路。本文应用直流潮流模型对网络潮流进行建模,故对首尾节点相同的线路进行了合并,统一建模为可扩展的输电通道。本文在该算例的全年8 760个"风-光-荷"数据中采用K-medoids聚类方法,选取了5个典型日来运行模拟规划模型,以各场景代表天数作为各自场景的权重,规划全年的运行成本以及弃风弃光成本。

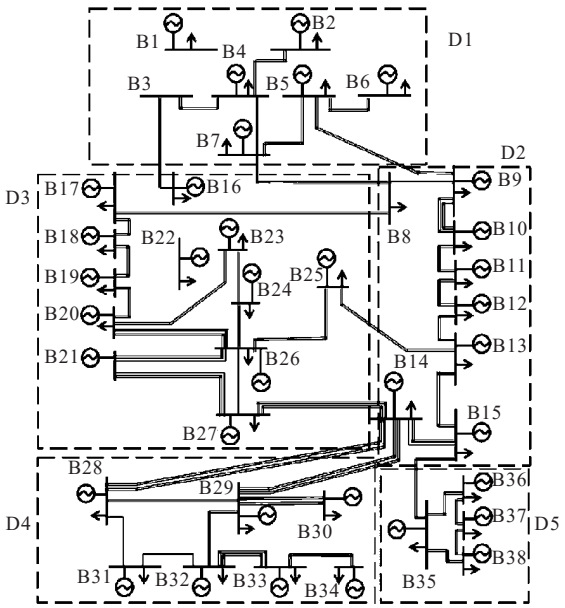

图2　HRP-38测试系统电路结构

Figure 2　HRP-38 Test System Circuit Structure

5.2　传统规划方案

先仅考虑系统的经济性进行规划,即以函数$F_1(x)$作为目标函数,寻找边界值$F_{1\min}(x)$与$F_{2\max}(x)$,其结果为总投资成本为41.95亿元,平均静态功角稳定裕度为0.775 8。典型日5的经济性规划静态功角稳定指标如图3所示。经济性规划线路投建状态如图4所示。在图4中,1表示该线路投建,0表示该线路未投建

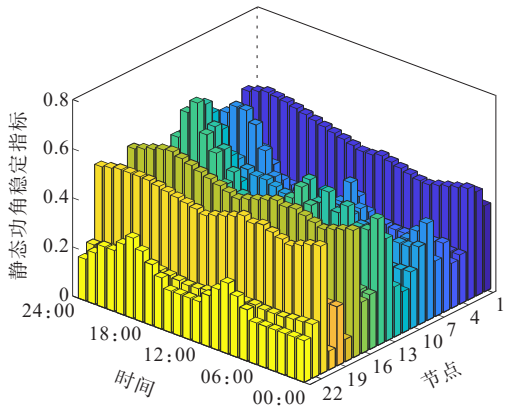

图3　典型日5的经济性规划静态功角稳定指标

Figure 3　Static power angle stability index for economy planning on typical day 5

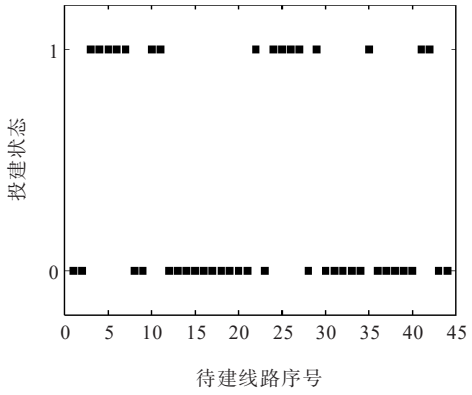

图 4 经济性规划线路投建状态

Figure 4 Status of economic planning line construction

再对系统的静态功角稳定性进行规划，即以函数 $F_2(x)$ 作为目标函数，寻找边界值 $F_{2\min}(x)$ 与 $F_{1\max}(x)$，其结果为总投资成本为 580.9 亿元，平均静态功角稳定裕度为 0.958 7。典型日 5 稳定性规划静态功角稳定指标如图 5 所示。稳定性规划线路投建状态如图 6 所示。在图 6 中，1 表示该线路投建，0 表示该线路未投建。

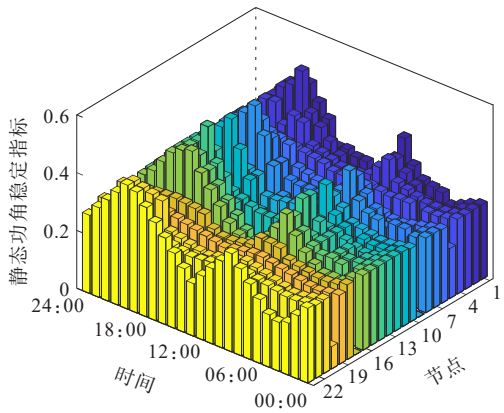

图 5 典型日 5 稳定性规划静态功角稳定指标

Figure5 Static power angle stability index for stability planning on typical day 5

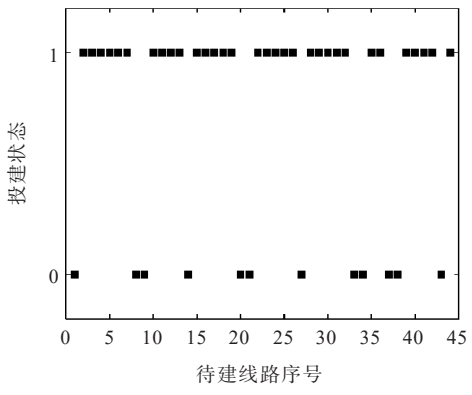

图 6 稳定性性规划线路投建状态

Figure 6 Status of stability planning line construction

比较这两种方案可知，在仅考虑经济性的情况下，系统的静态功角稳定裕度值处在一个比较差的状态，系统的稳定性需求无法得到满足；而在只考虑稳定性的情况下，则不仅系统的建设费用以及运行费用大幅提高，而且系统出现大规模弃风弃光现象，以牺牲新能源的消纳为代价，提高了系统的稳定性，这也与文 1 的结论一致。

在传统规划方案上进行加入静态功角稳定性约束的经济性调度。当稳定裕度约束必须大于 0.925 0 时，系统无可行解。这说明传统规划方案难以满足电网运行中的静态功角稳定需求。当稳定裕度约束必须大于 0.900 0 时，系统的新能源弃置损失达到 8.837 亿元。这也进一步说明传统规划方案难以兼顾系统的静态功角稳定性与在功角稳定约束下的新能源消纳率。

5.3 双目标拟合优化

由文 5.2 可知，传统仅考虑单一规划目标的规划难以同时顾及输电网系统规划的经济性与功角稳定性，须运用 ε 约束法求解。先选取第 2 个目标函数作为迭代对象，设定 $N=20$[17]。鉴于不同目标函数的基准值存在差异，依据式(39)进行归一化处理，得到相对经济性与相对系统功角稳定性。最后，按照文 4 的方法，获取帕累托前沿最优解。双目标优化帕累托前沿如图 7 所示。

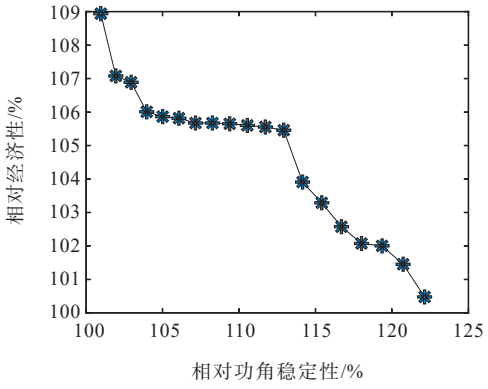

图 7 双目标优化帕累托前沿

Figure 7 Dual-objective optimization of Pareto front

综上所述，当系统极端地以系统稳定性作为规划目标时，其经济性成本会大幅度增加，而将稳定性作为第二目标进行分段求解时，仅付出较小的经济性损失即可大幅提升系统的静态功角稳定性，当 N 取 18 时，根据文 5.1、5.2 的分析，此时的双目标优化取到帕累托最优解，结果为总投资成本为 44.92 亿元，各典型日平均静态功角稳定裕度为 0.940 4。各规划方案对比见表 1。稳定性关键节点各方案新

能源弃置率对比如图8所示。

表 1　各规划方案对比

Table 1　Comparison of each planning schemes

目标函数	投建线路条数	年化线路建设费用/亿元	运行费用/亿元	弃风弃光损失/亿元	总投资/亿元	新能源弃置率/%
经济性	15	2.50	341.30	75.63	419.50	22.80
稳定性	29	6.22	416.10	158.50	580.90	43.23
帕累托最优	20	3.39	360.60	85.19	449.20	25.68

由表1可知，该帕累托最优方案兼顾了规划方案的经济性与功角稳定性。在新能源的消纳率上，与在传统规划的线路结构上进行稳定性约束的运行结果相比，双目标规划方案在不影响系统静态稳定性的基础上，降低了新能源的弃置损失，具有良好的新能源消纳性。

针对节点2、9、35等新能源富集（在5个典型日中多个时段新能源输入达到1 000 kW以上）且静态功角稳定性薄弱节点（该日多个时段稳定性指标大于0.5）进行新能源弃置率分析。从图9中可以看出，经济性规划中静态功角稳定性较差的节点，在稳定性约束运行下，为提高稳定裕度往往要付出较高的新能源弃置率。在双目标规划中兼顾了节点功角稳定与新能源消纳。

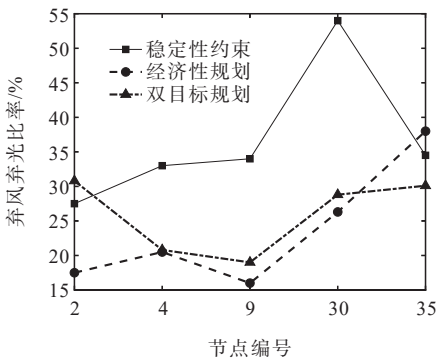

图 8　稳定性关键节点各方案新能源弃置率对比

Figure 8　Comparison of new energy disposal rates of each scheme at key nodes of stability

对McCormick包络法的误差精度进行分析，选取式（11）中的双线性项 $z=x_2P_E$ 进行误差分析，对比规划过程中的等效线性变量与规划结束后的 x_2 与 P_E 的实际值相乘的值，这二者的相对误差仅有7.8%，且误差大多发生在中间区段，对于端点的极大极小值，McCormick包络法的拟合效果较好，这说明了McCormick包络法适用于本文的输电网规划。

6　结语

本文构建新能源接入场景下的输电网静态功角稳定指标，借助McCormick包络线性化与ε约束法，将功角稳定性及经济性寻优问题构建成多目标混合整数优化模型。通过理论分析与算例仿真，得出以下结论：

1）传统静态功角稳定指标通常具有高度非线性特征，其计算过程复杂，且未充分考虑机端新能源等效接入因素，限制其在输电网规划优化模型中的应用。本文综合考量新能源接入的负电阻特性和火电机组的功角特性，构建了单端口耦合等值电路，并基于功角特性稳定方程，提出了静态功角稳定裕度指标。

2）本文运用短路比系数运算和McCormick包络线性化技术，对静态功角稳定裕度指标进行了简化处理。将输电网规划问题转化为多目标混合整数优化模型，通过结合ε约束法，实现静态功角稳定裕度指标在配电网优化运行中的有效应用。

3）本文构建的输电网多目标混合整数规划模型，充分兼顾了输电网规划的功角稳定性与经济性。采用基于多目标函数综合最优原则的帕累托前沿最优解获取方法，并通过算例分析验证了该规划方法的全面性和优越性。

在本文研究的基础上，未来研究工作可从以下几个方面进一步深化与拓展：首先，可以考虑将动态功角稳定性及暂态过程纳入优化模型，以提升复杂工况下电网安全评估的全面性，进而提高输电网规划在暂态稳定方面的安全性；其次，探索高比例新能源与储能系统协同接入场景下的多时间尺度耦合机理，构建源–网–储协同优化的动态规划框架。

参考文献：

[1]　黎博，陈民铀，钟海旺，等．高比例可再生能源新型电力系统长期规划综述[J]．中国电机工程学报，2023，43(2)：555-581.
LI Bo，CHEN Minyou，ZHONG Haiwang，et al. A review of long-term planning of new power systems with large share of renewable energy[J]. Proceedings of the CSEE，2023，43(2)：555-581.

[2]　张智刚，康重庆．碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]．中国电机工程学报，2022，42(8)：2806-2819.
ZHANG Zhigang，KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system

towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2819.

[3] 肖先勇, 郑子萱. "双碳"目标下新能源为主体的新型电力系统: 贡献、关键技术与挑战[J]. 工程科学与技术, 2022, 54(1): 47-59.
XIAO Xianyong, ZHENG Zixuan. New power systems dominated by renewable energy towards the goal of emission peak & carbon neutrality: contribution, key techniques, and challenges[J]. Advanced Engineering Sciences, 2022, 54(1): 47-59.

[4] 鲁宗相, 林弋莎, 乔颖, 等. 极高比例可再生能源电力系统的灵活性供需平衡[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(16): 3-16.
LU Zongxiang, LIN Yisha, QIAO Ying, et al. Flexibility supply-demand balance in power system with ultra-high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(16): 3-16.

[5] 毛安家, 马静, 蒯圣宇, 等. 高比例新能源替代常规电源后系统暂态稳定与电压稳定的演化机理[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(9): 2745-2756.
MAO Anjia, MA Jing, KUAI Shengyu, et al. Evolution mechanism of transient and voltage stability for power system with high renewable penetration level[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9): 2745-2756.

[6] 王清, 薛安成, 郑元杰, 等. 双馈型风电集中接入对暂态功角稳定的影响分析[J]. 电网技术, 2016, 40(3): 875-881.
WANG Qing, XUE Ancheng, ZHENG Yuanjie, et al. Impact of DFIG-based wind power integration on the transient stability of power systems[J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 875-881.

[7] 文云峰, 杨游航, 邢鹏翔, 等. 多维因素制约下新能源消纳能力评估方法研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(1): 127-147.
WEN Yunfeng, YANG Youhang, XING Pengxiang, et al. Review on the new energy accommodation capability evaluation methods considering multi-dimensional factors[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(1): 127-147.

[8] AKBARI T, RAHIMI-KIAN A, TAVAKOLI BINA M. Security-constrained transmission expansion planning: a stochastic multi-objective approach[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2012, 43(1): 444-453.

[9] 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.

[10] 王伟亮, 王丹, 贾宏杰, 等. 能源互联网背景下的典型区域综合能源系统稳态分析研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(12): 3292-3306.
WANG Weiliang, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. Review of steady-state analysis of typical regional integrated energy system under the background of energy Internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(12): 3292-3306.

[11] 舒印彪, 陈国平, 贺静波, 等. 构建以新能源为主体的新型电力系统框架研究[J]. 中国工程科学, 2021, 23(6): 61-69.
SHU Yinbiao, CHEN Guoping, HE Jingbo, et al. Building a new electric power system based on new energy sources[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 61-69.

[12] CHEN Y C, MAZHARI S M, CHUNG C Y, et al. Rotor angle stability prediction of power systems with high wind power penetration using a stability index vector[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(6): 4632-4643.

[13] GAN L, LI G Y, ZHOU M. Coordinated planning of large-scale wind farm integration system and regional transmission network considering static voltage stability constraints[J]. Electric Power Systems Research, 2016, 136: 298-308.

[14] 刘光晔, 杨以涵. 电力系统电压稳定与功角稳定的统一分析原理[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(13): 135-149.
LIU Guangye, YANG Yihan. Theoretical foundation of power system voltage and angle stability unified analysis [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(13): 135-149.

[15] 马宁宁, 谢小荣, 贺静波, 等. 高比例新能源和电力电子设备电力系统的宽频振荡研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(15): 4720-4732.
MA Ningning, XIE Xiaorong, HE Jingbo, et al. Review of wide-band oscillation in renewable and power electronics highly integrated power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(15): 4720-4732.

[16] 王渝红, 王馨瑶, 廖建权, 等. 交直流电网宽频振荡产生、辨识及抑制研究综述[J]. 高电压技术, 2023, 49(8): 3148-3162.
WANG Yuhong, WANG Xinyao, LIAO Jianquan, et al. Review of generation, identification and suppression of wide-band oscillation in AC-DC power system[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(8): 3148-3162.

[17] 吴志, 李广焕, 张小平, 等. 基于单端口耦合等值的配电网静态电压稳定指标分析及应用[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(23): 44-54.
WU Zhi, LI Guanghuan, ZHANG Xiaoping, et al. Analysis and application of static voltage stability indices for distribution network based on single-port

coupling equivalence[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(23): 44-54.

[18] 张建新, 刘宇明, 邱建, 等. 区域新能源并网暂态功角稳定分析与紧急控制策略优化[J]. 南方电网技术, 2024, 18(7): 129-138.
ZHANG Jianxin, LIU Yuming, QIU Jian, et al. Trainsient power angle stability analysis of regional new energy integration and coordinated control strategy[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(7): 129-138.

[19] WANG Y F, PORDANJANI I R, LI W X, et al. Voltage stability monitoring based on the concept of coupled single-port circuit[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(4): 2154-2163.

[20] TEIMOURZADEH S, AMINIFAR F. MILP formulation for transmission expansion planning with short-circuit level constraints[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 31(4): 3109-3118.

[21] DENG Lirong, SUN Hongbin, LI Baoju, et al. Optimal operation of integrated heat and electricity systems: a tightening McCormick approach[J]. Engineering, 2021, 7(8): 89-111.

[22] 牛东晓, 李建锋, 魏林君, 等. 跨区电网中风电消纳影响因素分析及综合评估方法研究[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 1087-1093.
NIU Dongxiao, LI Jianfeng, WEI Linjun, et al. Study on technical factors analysis and overall evaluation method regarding wind power integration in trans-provincial power grid[J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 1087-1093.

[23] 高庆忠, 赵琰, 穆昱壮, 等. 高渗透率可再生能源集成电力系统灵活性优化调度[J]. 电网技术, 2020, 44(10): 3761-3768.
GAO Qingzhong, ZHAO Yan, MU Yuzhuang, et al. Flexibility optimal dispatch of high-penetration renewable energy integrated power systems[J]. Power System Technology, 2020, 44(10): 3761-3768.

[24] 张缙, 刘智, 刘意, 等. 基于智能算法的双面散热 SiC 功率模块多目标优化设计[J]. 电工技术学报, 2023, 38(20): 5515-5529.
ZHANG Jin, LIU Zhi, LIU Yi, et al. Research on multi-objective optimization design of double-sided cooling SiC power module based on intelligent algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(20): 5515-5529.

[25] 黄文鑫, 吴军, 郭子辉, 等. 台风灾害下电网韧性评估及差异化规划[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(5): 84-91.
HUANG Wenxin, WU Jun, GUO Zihui, et al. Power grid resilience assessment and differentiated planning against typhoon disasters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(5): 84-91.

[26] ZHUO Z Y, ZHANG N, YANG J W, et al. Transmission expansion planning test system for AC/DC hybrid grid with high variable renewable energy penetration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(4): 2597-2608.