

计及多稳定约束的构网型风电集群交直流并联送出系统功率传输极限分析

丁少云¹, 屠增泽¹, 武海燕², 李佳朋¹, 王立强², 慕 腾², 李宇骏¹

(1. 西安交通大学 电气工程学院, 陕西 西安 710049; 2. 内蒙古电力(集团)有限公司 内蒙古电力科学研究院分公司, 内蒙古 呼和浩特 010000)

摘 要: 当前交直流并联送出系统功率传输极限分析较少兼顾多种暂态安全稳定约束, 因此易导致可行域偏乐观。针对交直流并联送出系统在多约束下功率可行域刻画困难、功率分配不明确等问题, 提出一种计及多稳定约束的构网型风电集群交直流并联送出系统功率传输极限分析方法。该方法从交直流传输功率的动态耦合机理出发, 综合刻画 $N-1$ 安全约束、暂态功角稳定约束和频率稳定约束下的交直流传输功率运行域, 并将最优功率配置问题转化为多约束运行域边界交点的解析求解问题, 从而实现功率配置的定量求解。仿真结果表明, 所提方法能够有效刻画多约束下的功率运行域, 并实现交直流功率的优化配置。

关键词: 交直流并联系统; 功率传输极限; 暂态功角稳定; 频率稳定; 虚拟同步机。

0 引言

随着“双碳”目标的推进, 可再生能源大规模开发及远距离输送已成为电力系统发展的重要趋势^[1]。我国已经建成了世界规模最大、电压等级最高的交直流混联电网^[2], 其中新能源经交直流混联送出已成为缓解负荷中心与能源基地逆向分布的有效手段。然而, 现有交直流送出系统功率传输极限研究多基于稳态潮流分析, 普遍较少考虑交流线路与直流线路在故障过程中的动态耦合关系, 易导致交直流传输功率可行域失真, 使系统在故障扰动下存在失稳风险。因此, 有必要综合考虑多种稳定约束对交直流系统功率传输极限的影响, 揭示交直流传输功率间的动态耦合机理, 从而提升系统送电能力与安全稳定运行水平。

目前, 送出系统功率传输极限的研究主要包括重复潮流法 (Repeated Power Flow, RPF)^[3-4]、连续潮流法 (Continuation Power Flow, CPF)^[5]、最优潮流法 (Optimal Power Flow, OPF)^[6] 和灵敏度法^[7-8] 4 种方法。其中, RPF 和 CPF 通过逐步提高传输功率确定极限, 但其增长路径通常依赖人工设定, 结果易受主观因素影响; OPF 能够在约束条件下求解功率传输

极限, 但在考虑多类约束时常面临计算耗时长、收敛性差的问题^[9]; 灵敏度法计算效率较高, 但通常以牺牲一定精度为代价。围绕上述 4 种方法, 文献[10]通过改进连续潮流模型提高了多区域互联网络功率传输极限计算的准确性。文献[11]研究基于有功潮流灵敏度和综合灵敏度的输电断面功率传输极限计算方法, 使用粒子群算法进行断面越限控制。与此同时, 随着电力电子设备的大量接入, 交直流混联系统故障下的稳定问题日益突出^[12]。文献[13]分析高比例可再生能源接入对交直流混联电网安全稳定性的影响。文献[14]从频率稳定角度提出交直流协调控制策略。文献[15]研究不同运行方式下交直流混联电网的稳定特性。文献[16]评估新能源出力不确定性对交直流外送系统最大输电能力的影响。总体来看, 现有研究多侧重稳态场景或数值分析, 对暂态过程中多种稳定约束如何共同作用于交直流系统功率传输极限的机理研究仍显不足。

综上所述, 本文针对交直流并联送出系统在多约束下功率可行域刻画困难、功率分配不明确等问题, 提出了一种计及多稳定约束的构网型风电集群交直流并联送出系统功率传输极限分析方法。研究的创新之处在于, 刻画了 $N-1$ 安全约束、暂态功角稳定约束和频率稳定约束下的交直流传输功率运行域, 并将最优功率配置问题转化为多约束运行域边界交点的解析求解问题, 实现功率配置的定量求解。

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2023YFB2405901)

Project Supported by National Key R&D Program of China (2023YFB2405901)

1 构网型风电集群经交直流送出系统模型

1.1 风电集群经交直流送出系统拓扑

风电集群经交直流并联送出系统拓扑如图1所示。其中,风电集群可等效为单台风电机组并入公共耦合点(Point of Common Coupling, PCC)^[17-18], X_{wind} 为风电机组等效电抗; X_{L1} 为连接PCC点和送端换流站的等效线路电抗; X_{L2} 为连接送端系统和受端系统的交流传输等效线路电抗; X_{L3} 为受端系统等效线路电抗; U_{pcc} 和 θ_{pcc} 为PCC点电压和相角, U_{scs} 和 θ_{scs} 为送端换流站端口的电压和相角; U_{sys} 和 θ_{sys} 为受端系统电压和相角; P_{wind} 和 Q_{wind} 为风电机组送出有功功率和无功功率; P_{DC} , Q_{DC} 和 P_{AC} , Q_{AC} 分别为直流线路和交流线路的有功功率和无功功率。需要说明的是,本文基于风电集群等效模型及受端无穷大系统假设,重点研究受端电网较强背景下的新能源交直流外送场景。同时,重点分析系统有功-频率动态及同步稳定特性,忽略电压/无功动态、限流饱和及控制器非线性等因素的影响。

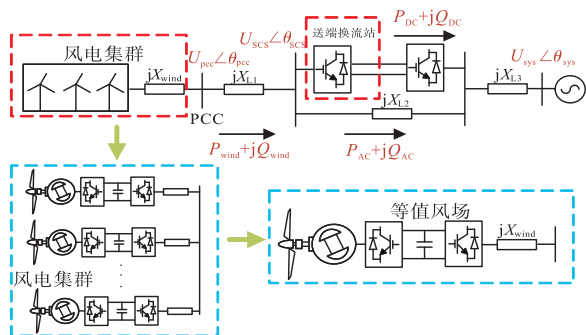


图1 风电集群经交直流并联送出系统拓扑

Fig.1 Topology of a wind power cluster transmission system with AC/DC parallel connection

1.2 风电集群模型

本文的研究系统如图1所示,其送端未配置同步机组,因此风电机组采用虚拟同步发电机(Virtual Synchronous Generator, VSG)控制,以提供频率和惯量支撑。鉴于暂态稳定性问题的时间尺度较短,分析时可以忽略风电机组的动态^[19-20];而频率稳定性问题的时间尺度较长,分析时需要考虑风电机组的动态^[21]。风电集群模型为:

$$\begin{cases} \frac{d\theta_{\text{pcc}}}{dt} = \omega_{\text{pcc}} \\ J_{\text{wind}} \frac{d\omega_{\text{pcc}}}{dt} = P_{\text{ref}}^{\text{wind}} - P_{\text{wind}} - D_{\text{wind}} (\omega_{\text{pcc}} - \omega_{\text{ref}}) \\ J_{\text{wind}} = \sum_{i \in W} J_{\text{wind},i}, D_{\text{wind}} = \sum_{i \in W} D_{\text{wind},i} \\ \Delta P_{\text{wind}} = -\Delta \omega_{\text{pcc}} \frac{J_{\text{wind}} s + D_{\text{wind}}}{1 + \tau_{\text{wind}} s} \end{cases} \quad (1)$$

式中: ω_{pcc} 为PCC点角频率; ω_{ref} 为系统的角频率参考值; $P_{\text{ref}}^{\text{wind}}$ 为风电集群VSG控制的有功功率参考值; $J_{\text{wind}}, D_{\text{wind}}$ 分别为VSG控制下风电集群的等值惯量系数与阻尼系数; $J_{\text{wind},i}, D_{\text{wind},i}$ 分别为第*i*台风电机组的惯量系数和阻尼系数; W 为风电机组集合; ΔP_{wind} 为风电集群输出有功功率变化量; $\Delta \omega_{\text{pcc}}$ 为PCC点角频率变化量; τ_{wind} 为风电集群时间常数; s 为拉普拉斯算子; t 为时间变量。

1.3 送端换流站模型

柔性直流送端换流站可采用电压-频率比(Voltage-Frequency, V-F)控制或VSG控制。考虑到V-F控制会将送端功率扰动全部转移至受端,不利于受端系统的安全稳定^[22]。因此本文对送端换流站采用VSG控制,以功率注入送端换流站方向为正,送端换流站模型为:

$$\begin{cases} \frac{d\theta_{\text{scs}}}{dt} = \omega_{\text{scs}} \\ J_{\text{scs}} \frac{d\omega_{\text{scs}}}{dt} = -P_{\text{scs}}^{\text{ref}} + P_{\text{DC}} - D_{\text{scs}} (\omega_{\text{scs}} - \omega_{\text{ref}}) \end{cases} \quad (2)$$

式中: ω_{scs} 为送端换流站的角频率; $J_{\text{scs}}, D_{\text{scs}}$ 分别为送端换流站VSG控制的惯量系数和阻尼系数; $P_{\text{scs}}^{\text{ref}}$ 为送端换流站VSG控制的有功功率参考值。

2 多稳定约束下交直流送出系统功率传输可行域判定

2.1 N-1安全约束下的功率传输可行域

N-1原则是保障电网安全运行的基本准则^[23-24]。在N-1安全约束下,发生交流输电线路断开(以下简称“交流断线”)或直流输电系统闭锁(以下简称“直流闭锁”)后,系统依然能保持正常运行。交流断线后的系统等效模型如图2所示。

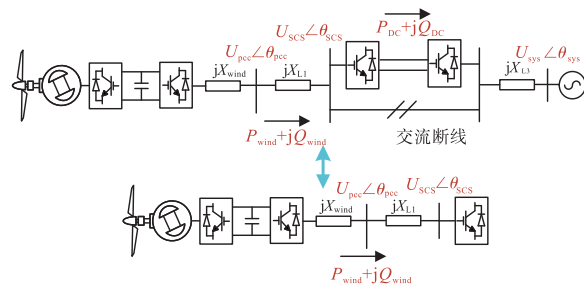


图2 交流断线后的系统等效模型

Fig.2 Equivalent model of system after AC line disconnection

由图2可知,在VSG的恒压控制下电压幅值维持恒定^[25],且柔性直流对送、受端系统具有电气隔离作用,故交流断线后系统的传输功率极限为:

$$P_{\text{wind}}^{\text{max}} = \frac{U_{\text{pcc}} U_{\text{scs}}}{X_{L1}} \quad (3)$$

式中: $P_{\text{wind}}^{\max}$ 为风电集群送出的最大有功功率。

直流闭锁后的系统等效模型如图3所示。

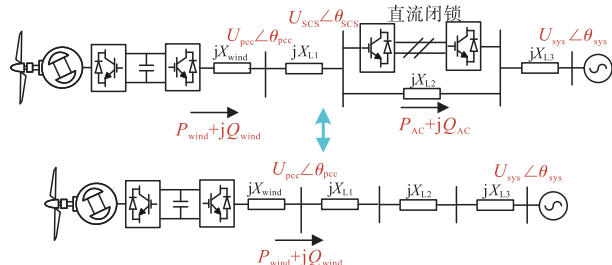


图3 直流闭锁后的系统等效模型

Fig.3 Equivalent model of system after DC blocking

由图3可知,直流闭锁后,送、受端通过交流输电线路直接连接,系统的传输功率极限为:

$$P_{\text{wind}}^{\max} = \frac{U_{\text{pcc}} U_{\text{sys}}}{X_{L1} + X_{L2} + X_{L3}} = \frac{U_{\text{pcc}} U_{\text{sys}}}{X_L^{\text{all}}} \quad (4)$$

式中: X_L^{all} 为系统交流线路总电抗。

由式(3)一式(4)可知,直流闭锁对应的传输功率极限更小,所以 $N-1$ 安全约束下系统的传输功率可行域为:

$$P_{\text{wind}} \leq \min \left\{ \frac{U_{\text{pcc}} U_{\text{scs}}}{X_{L1}}, \frac{U_{\text{pcc}} U_{\text{sys}}}{X_L^{\text{all}}} \right\} = \frac{U_{\text{pcc}} U_{\text{sys}}}{X_L^{\text{all}}} \quad (5)$$

2.2 暂态功角稳定约束下的功率传输可行域

直流闭锁会导致送端系统输出功率突然降低且功角特性发生改变,若直流功率转移量过大,则容易造成送端与受端的同步失稳。考虑直流闭锁前后 $P_{\text{wind}}^{\text{ref}}$ 不发生改变,系统的功率-相角曲线如图4所示。其中, θ 为相角, a 点为直流闭锁瞬间系统的运行点, b 点为正常状态下系统的稳定平衡点, c 点为直流闭锁后系统的稳定平衡点, d 点为直流闭锁后系统的不稳定平衡点。为了不失一般性,对功率采用标幺值进行分析。

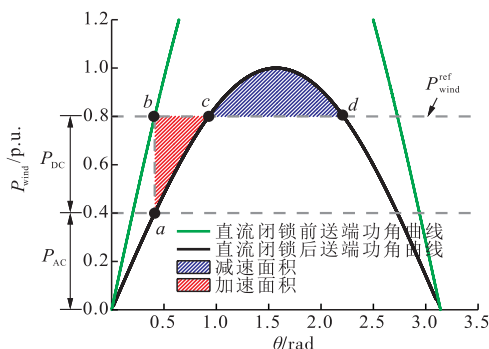


图4 直流闭锁前后系统功率-相角曲线

Fig.4 System power-phase angle curve before and after DC blocking

由图4可知,为保证系统的功角稳定性,直流闭锁后系统的加速面积应小于或等于最大减速面积,即:

$$\begin{cases} S_{\text{acc}} \leq S_{\text{dec}} \\ S_{\text{acc}} = \int_{\theta_a}^{\theta_c} \left[(P_{\text{AC}} + P_{\text{DC}}) - \frac{U_{\text{pcc}} U_{\text{sys}}}{X_L^{\text{all}}} \sin \theta \right] d\theta \\ S_{\text{dec}} = \int_{\theta_c}^{\theta_d} \left[\frac{U_{\text{pcc}} U_{\text{sys}}}{X_L^{\text{all}}} \sin \theta - (P_{\text{AC}} + P_{\text{DC}}) \right] d\theta \end{cases} \quad (6)$$

式中: $S_{\text{acc}}, S_{\text{dec}}$ 分别为加速和减速面积; $\theta_a, \theta_b, \theta_c, \theta_d$ 分别为直流闭锁后送端功角曲线上 a, b, c, d 点对应的相角。

满足送、受端功角稳定约束时 P_{DC} 与 P_{AC} 关系为:

$$\begin{aligned} & (P_{\text{AC}} + P_{\text{DC}}) \left(\pi - \sin^{-1} \frac{(P_{\text{AC}} + P_{\text{DC}}) X_L^{\text{all}}}{U_{\text{pcc}} U_{\text{sys}}} - \sin^{-1} \frac{P_{\text{AC}} X_L^{\text{all}}}{U_{\text{pcc}} U_{\text{sys}}} \right) - \\ & \frac{U_{\text{pcc}} U_{\text{sys}}}{X_L^{\text{all}}} \left(\sqrt{1 - \left[\frac{(P_{\text{AC}} + P_{\text{DC}}) X_L^{\text{all}}}{U_{\text{pcc}} U_{\text{sys}}} \right]^2} + \sqrt{1 - \left(\frac{P_{\text{AC}} X_L^{\text{all}}}{U_{\text{pcc}} U_{\text{sys}}} \right)^2} \right) \leq 0 \end{aligned} \quad (7)$$

由式(7)可知暂态功角稳定约束下功率传输可行域如图5所示。为不失一般性,对功率、电抗采用标幺值进行分析。由图5可知,当 X_L^{all} 增大时,功率传输可行域边界下移,可行域范围变小;当 X_L^{all} 减小时,功率传输可行域边界外扩,可行域范围变大。

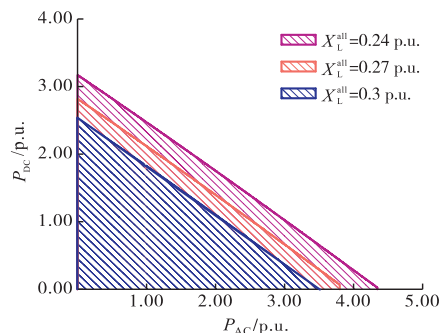


图5 暂态功角稳定约束下的功率传输可行域

Fig.5 Feasible region under synchronous stability constraints

为探究可行域随 X_L^{all} 变化的原因,将式(7)等价为:

$$\begin{cases} (x+y) \left(\pi - \sin^{-1}(x+y) - \sin^{-1} x \right) - \left(\sqrt{1 - (x+y)^2} + \sqrt{1 - x^2} \right) \leq 0 \\ x = \frac{P_{\text{AC}} X_L^{\text{all}}}{U_{\text{pcc}} U_{\text{sys}}} \\ y = \frac{P_{\text{DC}} X_L^{\text{all}}}{U_{\text{pcc}} U_{\text{sys}}} \end{cases} \quad (8)$$

式中: x, y 为二维笛卡尔坐标系中的横、纵坐标。

实际功率平面($P_{\text{AC}}, P_{\text{DC}}$)上的运行域通过式(9)所示的逆变换得到,即:

$$\begin{cases} P_{\text{AC}} = x \frac{U_{\text{pcc}} U_{\text{sys}}}{X_L^{\text{all}}} \\ P_{\text{DC}} = y \frac{U_{\text{pcc}} U_{\text{sys}}}{X_L^{\text{all}}} \end{cases} \quad (9)$$

式(8)刻画了一个二维平面上的固定运行域,而式(9)表明实际运行域是式(8)所表示运行域的线性缩放,缩放因子值为 $U_{pcc} U_{sys} / X_L^{all}$ 。所以,当 X_L^{all} 增大时,缩放因子减小,运行域边界向原点收缩,运行域边界下移,范围变小;当 X_L^{all} 减小时,缩放因子增大,运行域边界外扩,范围变大。

2.3 频率稳定约束下的功率传输可行域

由于送端换流站参考功率调节较慢,交流断线后其参考功率仍维持故障前水平,使得原本由交流线路传输的功率无法送出,从而造成送端产生大量有功盈余,进而引发频率稳定问题。因此,为保证交流断线后送端频率偏差和频率变化率(Rate of Change of Frequency, RoCoF)不越限,交流断线产生的转移功率需满足相应约束。频率稳定性分析假设系统角频率处处相等,即 $\omega_{pcc} \approx \omega_{scs} \approx \omega$,根据式(1)一式(2)可得:

$$\begin{cases} \Delta P_{DC} = (J_{scs}s + D_{scs})\Delta\omega \\ \Delta P_{wind} = -\Delta\omega \frac{J_{wind}s + D_{wind}}{1 + \tau_{wind}s} \end{cases} \quad (10)$$

式中: ΔP_{DC} 为直流线路有功功率变化量; $\Delta\omega$ 为系统角频率变化量。

交流断线后,交流线路功率突然下降,定义 Δf 为系统频率变化量, ΔP_{AC} 为交流线路有功功率变化量,则 $\Delta P_{AC} = -P_{AC}/s$,将式(10)代入功率平衡方程 $\Delta P_{wind} = \Delta P_{AC} + \Delta P_{DC}$ 可得:

$$\Delta f(s) = \Delta\omega(s) = \frac{P_{AC}}{s} \frac{1}{J_{scs}s + D_{scs} + \frac{1}{1 + \tau_{wind}s} (J_{wind}s + D_{wind})} \quad (11)$$

式中: $\Delta f(\cdot)$, $\Delta\omega(\cdot)$ 分别为 Δf 和 $\Delta\omega$ 对应的频域函数。

由终值定理以及频率的动态特征可得最大频率偏差与频率变化率为:

$$\begin{cases} \Delta f_{max}^{act} = \lim_{s \rightarrow 0} s\Delta f(s) = \frac{P_{AC}}{D_{wind} + D_{scs}} = \frac{P_{AC}}{D_{\Sigma}} \\ f_{RoCoF}^{max,act} = \lim_{s \rightarrow \infty} s\Delta f(s) = \frac{P_{AC}}{J_{wind} + J_{scs}} = \frac{P_{AC}}{J_{\Sigma}} \end{cases} \quad (12)$$

式中: Δf_{max}^{act} , $f_{RoCoF}^{max,act}$ 分别为交流断线后系统实际的最大频率偏差和最大频率变化率; D_{Σ} 为风电集群阻尼与送端换流站阻尼之和; J_{Σ} 为风电集群惯量与送端换流站惯量之和。

为保证送端频率偏差和变化率不越限,交流线路有功功率 P_{AC} 应满足:

$$\begin{cases} \Delta f_{max}^{act} \leq \Delta f_{max}^{std} \\ f_{RoCoF}^{max,act} \leq f_{RoCoF}^{std} \end{cases} \Rightarrow P_{AC} \leq \min \{ D_{\Sigma} \Delta f_{max}^{std}, J_{\Sigma} f_{RoCoF}^{std} \} \quad (13)$$

式中: Δf_{max}^{std} 为系统规定的最大频率偏差,取 0.2 Hz^[26]; f_{RoCoF}^{std} 为系统规定的最大频率变化率,取 0.25 Hz/s^[27]。

为保证系统稳定且具有合理的暂态响应, VSG 惯量系数通常大于阻尼系数^[28],且本文 $f_{RoCoF}^{max, std} > \Delta f_{max}^{std}$,因此频率稳定约束下的功率传输可行域如式(14)所示。由式(14)可知,仅 P_{AC} 受频率稳定约束的限制,且 D_{Σ} 越大,系统所允许的交流线路传输功率上限也越高。

$$P_{AC} \leq D_{\Sigma} \Delta f_{max}^{std} \quad (14)$$

3 交直流功率传输最优配置方法

3.1 多约束下功率传输可行域分析

多约束下交直流传输功率的可行域如图6所示。其中,绿色区域为 N-1 安全约束下的功率可行域;蓝色区域为暂态功角稳定约束下的功率传输可行域;红色区域为频率稳定约束下的功率传输可行域;红色虚线为等传输功率线,线上各点总传输功率相等。由图6可知,当 $P_{DC}=0$ 时,直流闭锁不影响系统的暂态功角稳定,此时暂态功角稳定约束边界与 N-1 安全约束边界重合;当 $P_{DC} \neq 0$ 时,暂态功角稳定约束边界包含在 N-1 安全约束边界内。

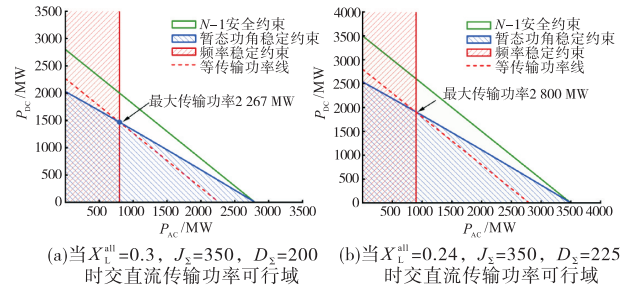


图6 多约束下交直流功率传输可行域

Fig.6 Feasible region for AC/DC power transfer under multiple constraints

由2.2节分析可知,送端系统与受端系统要满足暂态功角稳定必存在以下关系式:

$$P_{AC} + P_{DC} \leq \frac{U_{pcc} U_{sys}}{X_L^{all}} \sin \Delta\theta_{ps} \leq \frac{U_{pcc} U_{sys}}{X_L^{all}} \quad (15)$$

式中: $\Delta\theta_{ps}$ 为直流闭锁后风场与送端换流站之间的功角差。

式(15)表明,在图6所示的功率可行域中,蓝色区域始终被包含在绿色区域下方。因此,系统最大功率传输极限由暂态功角稳定约束边界与频率稳定约束边界所决定。

3.2 交直流功率传输最优配置及影响因素分析

多约束下系统的功率传输极限为:

$$\begin{cases} \max P_{\text{wind}} = P_{\text{AC}} + P_{\text{DC}} \\ \text{s.t.} (P_{\text{AC}}, P_{\text{DC}}) \in \Omega \end{cases} \quad (16)$$

式中: Ω 为暂态功角稳定约束与频率稳定约束下的功率运行域。

系统加、减速面积随 P_{AC} 的变化如图7所示。其中,为不失一般性功率采用标么制进行分析。 m 点和 n 点分别为 P_{AC} 增大前后系统的稳定平衡点, l 点和 u 点分别为直流闭锁后系统的稳定平衡点和不稳定平衡点。由图7可知,直流闭锁瞬间功角不突变,当风电集群送输出功率 P_{wind} 不变而交流线路功率 P_{AC} 增大时,直流闭锁前系统稳定平衡点由 m 点移至 n 点,直流闭锁后系统的稳定平衡点 l 点与不稳定平衡点 u 点保持不变,导致加速面积减小、最大减速面积保持不变。因此在暂态功角稳定约束的边界上,随着 P_{AC} 的增大,系统功率传输极限增大,而 P_{AC} 又受限于频率稳定约束限制,故暂态功角稳定约束边界与频率稳定约束边界的交点即为最优功率配置点。

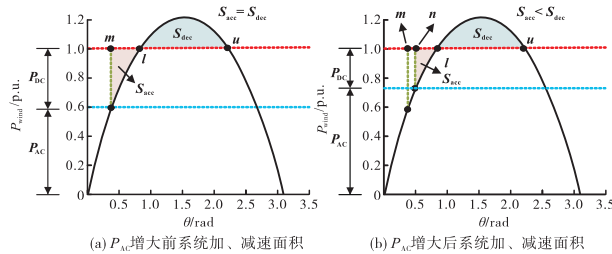


图7 系统加、减速面积随 P_{AC} 的变化

Fig.7 Variation of system acceleration and deceleration areas with P_{AC}

因此,最优功率配置点的交直流传输功率为:

$$\begin{cases} (P_{\text{AC}}^{\text{opt}} + P_{\text{DC}}^{\text{opt}}) \left(\pi - \sin^{-1} \left(\frac{(P_{\text{AC}}^{\text{opt}} + P_{\text{DC}}^{\text{opt}}) X_{\text{L}}^{\text{all}}}{U_{\text{pcc}} U_{\text{sys}}} \right) - \sin^{-1} \frac{P_{\text{DC}}^{\text{opt}} X_{\text{L}}^{\text{all}}}{U_{\text{pcc}} U_{\text{sys}}} \right) - \\ \frac{U_{\text{pcc}} U_{\text{sys}}}{X_{\text{L}}^{\text{all}}} \left(\sqrt{1 - \left[\frac{(P_{\text{AC}}^{\text{opt}} + P_{\text{DC}}^{\text{opt}}) X_{\text{L}}^{\text{all}}}{U_{\text{pcc}} U_{\text{sys}}} \right]^2} + \sqrt{1 - \left(\frac{P_{\text{DC}}^{\text{opt}} X_{\text{L}}^{\text{all}}}{U_{\text{pcc}} U_{\text{sys}}} \right)^2} \right) \leq 0 \\ P_{\text{AC}}^{\text{opt}} = D_{\Sigma} \Delta f_{\text{std}}^{\text{std}} \end{cases} \quad (17)$$

式中: $P_{\text{AC}}^{\text{opt}}$ 为最优功率配置点对应的交流线路功率; $P_{\text{DC}}^{\text{opt}}$ 为最优功率配置点对应的直流线路功率。

结合第2节分析,表明 $X_{\text{L}}^{\text{all}}$ 和 D_{Σ} 是影响暂态功角稳定约束运行域与频率稳定约束运行域的关键因素。因此,系统的最优功率配置 $P_{\text{AC}}^{\text{opt}}$, $P_{\text{DC}}^{\text{opt}}$ 与 $X_{\text{L}}^{\text{all}}$, D_{Σ} 相关。由图6可知, D_{Σ} 减小使频率稳定约束运行域左移, $X_{\text{L}}^{\text{all}}$ 减小使暂态功角稳定约束运行域上移。当 D_{Σ} 增大时,最优功率配置点向 $P_{\text{AC}}^{\text{opt}}$ 增大、 $P_{\text{DC}}^{\text{opt}}$ 减小的方向移动;当 $X_{\text{L}}^{\text{all}}$ 增大时, $P_{\text{AC}}^{\text{opt}}$ 保持不变,最优功率配置点向 $P_{\text{DC}}^{\text{opt}}$ 减小的方向移动。因此, $P_{\text{AC}}^{\text{opt}}$ 仅取决于

D_{Σ} , D_{Σ} 越大则 $P_{\text{AC}}^{\text{opt}}$ 越大;而 $P_{\text{DC}}^{\text{opt}}$ 同时受 $X_{\text{L}}^{\text{all}}$ 和 D_{Σ} 的影响, $X_{\text{L}}^{\text{all}}$ 和 D_{Σ} 越大, $P_{\text{DC}}^{\text{opt}}$ 越小。

4 仿真分析

为验证交直流传输功率最优配置方法的准确性,基于MATLAB/Simulink仿真平台对图1所示系统进行分析,通过瞬间同时断开两端断路器来模拟交流线路断开,串联投入大电阻来模拟直流闭锁。交直流并联送出系统主要仿真参数为: $X_{\text{L1}}=0.14$ p.u., $X_{\text{L2}}=0.03$ p.u., $X_{\text{L3}}=0.07$ p.u., $J_{\text{wind}}=200$ p.u., $J_{\text{scs}}=150$ p.u., $D_{\text{wind}}=125$ p.u., $D_{\text{scs}}=100$ p.u.。

4.1 多约束功率配置方法的必要性分析

单一频率约束与本文所提多约束下交直流并联送出系统动态响应对比如图8所示。其中,单一频率约束下 P_{AC} 为900 MW, P_{DC} 为2 000 MW;本文所提多约束下 P_{AC} 为900 MW, P_{DC} 为1 900 MW。 θ_{ps} 为PCC点与送端换流站之间的相角差, f 为系统频率。

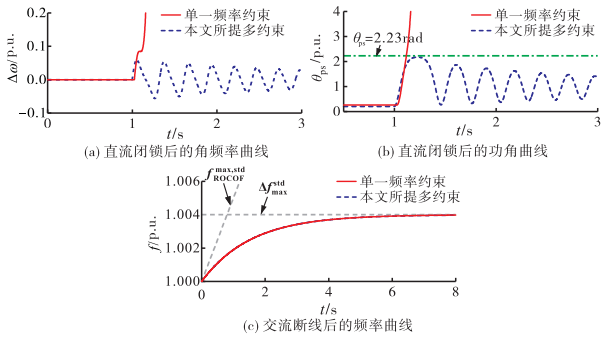


图8 2种约束下交直流并联送出系统动态响应对比
Fig.8 Comparison of dynamic responses of AC/DC parallel transmission system under two constraints

由图8可知,图8(a)—图8(b)中单一频率约束下,直流功率配置偏大,导致直流闭锁后送端功角和角频率失稳,而本文所提多约束下系统暂态稳定;图8(c)中单一频率约束与本文所提多约束均能保证交流断线后送端频率指标满足要求。分析表明,单一频率约束不能满足系统在故障后的安全稳定约束,凸显了本文所提多约束配置方法的必要性。

4.2 功率配置方法的最优性分析

传输功率极限相同时,不同交直流功率配置方法下系统在故障后的动态响应如图9所示。其中,案例1为本文所提多约束方法,其 P_{AC} 为1 000 MW、 P_{DC} 为1 800 MW;案例2为仅考虑暂态功角稳定约束,其 P_{AC} 为900 MW、 P_{DC} 为1 900 MW;案例3为仅考虑频率约束,其 P_{AC} 为600 MW、 P_{DC} 为2 200 MW。由图9可知,图9(a)中案例3配置结果在直流闭锁后

会发生暂态角频率失稳;图9(b)中案例3配置结果在直流闭锁后会发暂态功角失稳,且案例2相角的最大值刚好达到临界角度 θ_{ps} 为2.01 rad,表明其安全裕度较低;图9(c)中案例2配置结果在交流断线后会发频率越限。分析表明,在传输功率极限相同时,案例1在故障后可同时满足功角稳定和频率稳定,表明了本文所提多约束功率配置方法的最优性。

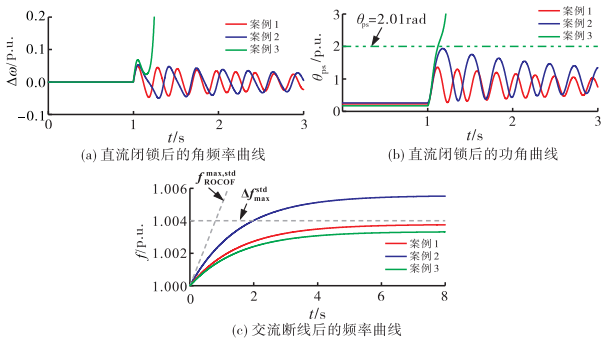


图9 不同交直流功率配置方法下系统故障后的动态响应
Fig.9 Dynamic response of system after fault under different power configuration methods

4.3 本文所提功率配置方法的影响因素分析

为了直观对比系统参数对本文所提功率配置方法的影响,不同参数下交直流传输功率最优配置结果如表1所示。其中,案例1—7为7组 $X_L^{all}, J_{\Sigma}, D_{\Sigma}$ 参数配置下系统功率最优配置结果。

表1 不同参数下交直流功率传输最优配置结果
Table 1 Optimal configuration results of AC/DC power transfer under different parameters

案例	$X_L^{all}/p.u.$	$J_{\Sigma}/p.u.$	$D_{\Sigma}/p.u.$	P_{AC}^{opt}/MW	P_{DC}^{opt}/MW
1	0.3	350	200	800	1 467
2	0.27	350	200	800	1 694
3	0.24	350	200	800	1 976
4	0.24	350	225	900	1 900
5	0.24	350	250	1 000	1 840
6	0.24	325	250	1 000	1 840
7	0.24	300	250	1 000	1 840

由表1可知,案例1—3中,参数 J_{Σ}, D_{Σ} 相同, P_{DC}^{opt} 随 X_L^{all} 的增大而减小,而 P_{AC}^{opt} 不受影响;案例3—5中,参数 X_L^{all}, J_{Σ} 相同, P_{AC}^{opt} 随 D_{Σ} 的增大而增大,而 P_{DC}^{opt} 随 D_{Σ} 的增大而减小;案例5—7中,参数 X_L^{all}, D_{Σ} 相同, J_{Σ} 发生改变时不影响 $P_{AC}^{opt}, P_{DC}^{opt}$ 的数值。分析表明, P_{AC}^{opt} 只与 D_{Σ} 有关, D_{Σ} 越大 P_{AC}^{opt} 越大; P_{DC}^{opt} 由 X_L^{all}, D_{Σ} 共同决定, X_L^{all}, D_{Σ} 越大, P_{DC}^{opt} 越小。仿真结果与第3.3节的分析一致,验证了理论分析的准确性。

4.4 不同功率配置方法系统性能指标对比

常规 $N-1$ 安全约束配置方法会引发频率越限

和暂态功角失稳,本文配置方法能规避暂态安全问题,但会牺牲功率传输极限。为定量比较不同功率配置方法在满足相同功率传输极限时的综合性能,定义并计算了FOLD,TS及PS 3项指标,结果如表2所示。其中,频率越限程度(Frequency Out of Limit Degree, FOLD)、暂态功角稳定性(Transient Stability, TS)为暂态安全指标;功率牺牲量(Power Sacrifice, PS)为功率传输极限损失指标。由表2可知,不同参数 X_L^{all} 下, $N-1$ 安全约束配置方法均会发生不同程度的频率越限和暂态功角度失稳,而本文配置方法以牺牲约20%的送电能力为代价保证了系统在故障后的暂态安全,说明本文配置方法在动态安全性与输电能力之间实现了较好平衡。

表2 系统参数 X_L^{all} 对功率配置方法性能指标的影响
Table 2 Impact of system parameter X_L^{all} on performance indices of power configuration methods

$X_L^{all}/p.u.$	N-1 安全约束配置方法			本文配置方法	
	$P_{wind}^{max}/p.u.$	FOLD	TS	$P_{wind}^{max}/p.u.$	PS/%
0.1	10.5	4.83	失稳	7.88	24.95%
0.2	5.25	1.92	失稳	4.08	22.29%
0.3	3.50	0.94	失稳	2.80	20%
0.4	2.63	0.46	失稳	2.17	17.46%

5 结语

为了解决交直流并联送出系统在多约束下功率可行域刻画困难、功率分配不明确等问题,本文提出了一种计及多稳定约束的构网型风电集群交直流并联送出系统功率传输极限分析方法。通过刻画静态安全、暂态功角稳定和频率稳定约束下的交直流传输功率运行域,并将最优功率配置问题转化为多约束运行域边界交点的解析求解问题,实现功率配置的定量求解,从而为交直流外送通道实时功率调度提供支持。

未来可进一步考虑风电出力不确定性及多时间尺度耦合特性对运行域的影响,提升方法在复杂场景下的适应性

参考文献

[1] 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): 2806-2818.
ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and perspectives of constructing a new type of power system under the goal of carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2818.

[2] 沈伟淳,彭弘毅,晏鸣宇. 高比例新能源接入的交直流混联配电系统分散协同调度方法[J]. 智慧电力, 2025, 53(10): 36-43.

- SHEN Yichun, PENG Hongyi, YAN Mingyu. Decentralized collaborative dispatching method for AC/DC hybrid distribution system with high proportion of new energy access[J]. Smart Power, 2025, 53 (10): 36-43.
- [3] FENG F, ZHANG P, ZHOU Y, et al. Distributed networked microgrids power flow[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 38(2): 1405-1419.
- [4] WANG T, WANG S, MA S, et al. An extended continuation power flow method for static voltage stability assessment of renewable power generation-penetrated power systems[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2022, 71(2): 892-896.
- [5] 李雪, 刘益臣, 姜涛, 等. 混合多端交直流电力系统静态电压稳定域的全纯嵌入构建方法[J]. 电力自动化设备, 2025, 45(4): 143-152.
- LI Xue, LIU Yichen, JIANG Tao, et al. Holomorphic embedding forming method of static voltage stability region of hybrid multi-terminal AC/DC power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2025, 45(4): 143-152.
- [6] 陈萍, 党喜, 刘龙成, 等. 考虑风光不确定性的暂态稳定约束最优潮流模型研究[J]. 智慧电力, 2024, 52(3): 17-24.
- CHEN Ping, DANG Xi, LIU Longcheng, et al. Study on transient stability constrained optimal power flow model considering wind and solar uncertainty[J]. Smart Power, 2024, 52(3): 17-24.
- [7] 王傲玉, 刘俊良, 杜雄, 等. 基于距离系数的并网系统稳定性参数灵敏度分析法[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(9): 164-171.
- WANG Aoyu, LIU Junliang, DU Xiong, et al. Sensitivity analysis method for stability parameters of grid connected system based on distance coefficient[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(9): 164-171.
- [8] 赵开联, 唐岚, 杨婧, 等. 基于潮流追踪和功率灵敏度的线路过载紧急控制策略[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(11): 104-113.
- ZHAO Kailian, TANG Lan, YANG Jing, et al. Line overload emergency control strategy based on power flow tracking and power sensitivity[J]. Electric Machines & Control Application, 2021, 48(11): 104-113.
- [9] CHOWDHURY M M U T, BISWAS B D, KAMALASADAN S. Second-order cone programming (SOCP) model for three phase optimal power flow (OPF) in active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(5): 3732-3743.
- [10] DONG X, HAO X, CHEN Q, et al. A distributed power transfer limit calculation method for multi-area interconnection power networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(5): 4723-4732.
- [11] 徐正清, 肖艳伟, 李群山, 等. 基于灵敏度及粒子群算法的输电断面功率越限控制方法对比研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(15): 177-192.
- XU Zhengqing, XIAO Yanwei, LI Qunshan, et al. Comparative study of transmission section power overrun control methods based on sensitivity and particle swarm algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(15): 177-192.
- [12] 姜妍, 彭克, 赵学深, 等. 基于非线性解耦方法的交直流配电系统暂态稳定性分析[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(17): 56-65.
- JIANG Yan, PENG Ke, ZHAO Xueshen, et al. Transient stability analysis of AC/DC distribution system based on nonlinear decoupling method [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48 (17): 56-65.
- [13] 滕志远, 陈新, 张东辉. 交直流混联系统的统一导阻网络建模及其稳定性分析[J]. 电工技术学报, 2025, 40(9): 2864-2879.
- TENG Zhiyuan, CHEN Xin, ZHANG Donghui. Unified conduction resistance network modeling and stability analysis of AC/DC hybrid system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40 (9): 2864-2879.
- [14] 陈汉雄, 李婷, 李奥. 提升电网运行的交直流系统协调控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(10): 123-134.
- CHEN Hanxiong, LI Ting, LI Ao. Research on coordinated control strategy of AC and DC systems to improve grid operation[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49 (10): 123-134.
- [15] 姜淞瀚, 彭克, 赵学深, 等. 多端交直流配电系统的降阶建模与稳定域分析[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(18): 189-198.
- JIANG Songhan, PENG Ke, ZHAO Xueshen, et al. Reduced order modeling and stability region analysis of multi terminal AC/DC distribution systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48 (18): 189-198.
- [16] 张艳, 张旭, 张静怡, 等. 考虑风电不确定性的沙戈荒新能源基地交直流混合外送系统最大传输能力评估[J]. 电力建设, 2024, 45(12): 174-186.
- ZHANG Yan, ZHANG Xu, ZHANG Jingyi, et al. Evaluation of maximum transmission capacity of AC/DC hybrid transmission system in shagehuang new energy base considering wind power uncertainty[J]. Electric Power Construction, 2024, 45 (12): 174-186.
- [17] SUBEDI S, GUI Y, XUE Y. Applications of data-driven dynamic modeling of power converters in power systems: An overview[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2025, 61 (2): 2434-2456.
- [18] WU C, ZHANG X P, STERLING M. Wind power generation variations and aggregations[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2022, 8(1): 17-38.
- [19] 韩平平, 熊瑶, 吴红斌, 等. 含构网型直驱风机的电力系统暂态功角稳定性分析与控制策略[J]. 电力自动化设备, 2025, 45(9): 70-78.
- HAN Pingping, XIONG Yao, WU Hongbin, et al. Transient power angle stability analysis and control strategy of power system with grid connected direct drive fans[J]. Electric Power Automation Equipment, 2025, 45 (9): 70-78.
- [20] 江琴, 刘天琪, 曾雪洋, 等. 大规模风电与直流综合作用对送端系统暂态稳定影响机理[J]. 电网技术, 2018, 42(7): 2038-2046.
- JIANG Qin, LIU Tianqi, ZENG Xueyang, et al. Influence mechanism of large-scale wind power and DC combined effect on transient stability of sending end system [J]. Power System Technology, 2018, 42 (7): 2038-2046.
- [21] 朱瑛, 秦立宽, 颜全椿, 等. 考虑频率响应过程的风储联合调频策略及储能系统优化配置方法[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(10): 28-35.

- ZHU Ying, QIN Likuan, YAN Quanchun, et al. Joint frequency modulation strategy of wind energy storage considering frequency response process and optimal configuration method of energy storage system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10):28-35.
- [22] YUAN X, DU Z, LI Y, et al. Two-stage coordinated control of type-4 wind turbine with grid-forming ability for active damping support[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2023, 39(2):817-830.
- [23] 李响, 郭志忠. 基于N-1原则的输电断面传送功率能力分析[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(9):28-30.
- LI Xiang, GUO Zhizhong. Analysis of power transfer capability of transmission section based on N-1 principle[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(9):28-30.
- [24] 徐鹏, 王潇潇, 赵伟, 等. 计及下垂特性的换流器静态传输功率极限分析[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(11):1-8, 15.
- XU Peng, WANG Xiaoxiao, ZHAO Wei, et al. Static transmission power limit analysis of converter considering droop characteristics[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(11):1-8, 15.
- [25] 朱誉, 屠增泽, 余达, 等. 考虑限流的基于多李雅普诺夫法的虚拟同步机暂态稳定判据[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(3):120-129.
- ZHU Yu, TU Zengze, YU Da, et al. Transient stability criterion of virtual synchronous machine based on multi Lyapunov method considering current limiting[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(3):120-129.
- [26] 杨德健, 楚晓玮, 李传亮, 等. 考虑动态频率稳定性及储能快速频率支撑的风功率承载极限解析计算[J]. 智慧电力, 2025, 53(11):73-80.
- YANG Dejian, CHU Xiaowei, LI Chuanliang, et al. Analytical calculation of wind power bearing limit considering dynamic frequency stability and fast frequency support of energy storage[J]. Smart Power, 2025, 53(11):73-80.
- [27] 汪梦军, 郭剑波, 马士聪, 等. 新能源电力系统暂态频率稳定分析与调频控制方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(5):1672-1694.
- WANG Mengjun, GUO Jianbo, MA Shicong, et al. Summary of transient frequency stability analysis and frequency modulation control methods for new energy power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(5):1672-1694.
- [28] 詹长江, 吴恒, 王雄飞, 等. 构网型变流器稳定性研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(6):2339-2359.
- ZHAN Changjiang, WU Heng, WANG Xiongfei, et al. Review on stability research of grid converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(6):2339-2359.

(责任编辑 李 萌)

收稿日期:2025-11-27; 修改日期:2026-04-08

作者简介:丁少云(2002),男,河南驻马店人,硕士研究生,主要研究方向为新型电力系统稳定性分析与控制。E-mail:shaoyunding@stu.xjtu.edu.cn

李宇骏(1990),男,通信作者,江西南昌人,博士,教授,主要研究方向为电力系统稳定与控制、新能源并网和高压直流建模、电力系统故障分析等。E-mail:yujunli@xjtu.edu.cn

Analysis of Power Transfer Limit for Grid-forming Wind Farm Clusters via AC-DC Parallel Outgoing Lines Considering Multiple Stability Constraints

DING Shaoyun¹, TU Zengze¹, WU Haiyan², LI Jiapeng¹, WANG Liqiang²,
MU Teng², LI Yujun¹

(1.School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Inner Mongolia Power (Group) Co., Ltd. Inner Mongolia Electric Power Research Institute Branch, Hohhot 010000, China)

Abstract: Current power transmission limit analyses for AC/DC parallel transmission systems rarely consider multiple transient security and stability constraints, which tends to yield an overly optimistic feasible region. To address the difficulties in characterizing the power feasible region under multiple constraints and the ambiguity in power allocation in AC/DC parallel transmission systems, this paper proposes a power transmission limit analysis method for grid-forming wind farm clusters in AC/DC parallel transmission systems considering multiple stability constraints. Starting from the dynamic coupling mechanism of AC and DC transmission powers, this method comprehensively characterizes the AC/DC transmission power operating region under N-1 security constraints, transient rotor angle stability constraints, and frequency stability constraints. It then transforms the optimal power allocation problem into an analytical solution of the intersection points of the boundaries of the multi-constraint operating region, thereby enabling quantitative determination of power allocation. Simulation results show that the proposed method can effectively characterize the power operating region under multiple constraints and achieve optimal allocation of AC and DC powers.

Key words: AC/DC parallel system; power transfer limit; transient rotor angle stability; frequency stability; virtual synchronous generator