

文章编号:1672-3961(2024)02-0174-09 DOI:10.6040/j.issn.1672-3961.0.2022.356

提升高比例新能源送端电网暂态电压安全的调相机优化配置策略

杨金刚¹,石振江¹,何成明¹,李笑蓉¹,梁永亮^{2*}

(1.国网冀北电力有限公司经济技术研究院,北京 100038; 2.山东大学电气工程学院,山东 济南 250061)

摘要:以提升高比例新能源送端电网的暂态电压安全性为目标,研究调相机组的选址和定容优化配置问题。基于新能源机组高/低电压安全穿越标准建立暂态电压安全评估指标,提出调相机安装站点优选方法。综合考虑送端电网暂态电压安全和外送通道功率输送要求,构建调相机配置容量优化模型,提出应用天牛群算法的模型求解方法。通过对高比例新能源送端电网仿真分析,验证了所提调相机优化配置策略能够有效提升送端电网暂态电压安全水平并减少故障扰动下外送通道功率与故障前调度值偏差。

关键词:高比例新能源;送端电网;调相机配置;暂态电压安全;外送通道

中图分类号:TM712 **文献标志码:**A

引用格式:杨金刚,石振江,何成明,等. 提升高比例新能源送端电网暂态电压安全的调相机优化配置策略[J].山东大学学报(工学版),2024,54(2):174-182.

YANG Jingang, SHI Zhenjiang, HE Chengming, et al. Optimal configuration strategy of condenser for improving short-term voltage safety in a sending-end power grid with a high renewable penetration level[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2024, 54(2):174-182.

Optimal configuration strategy of condenser for improving short-term voltage safety in a sending-end power grid with a high renewable penetration level

YANG Jingang¹, SHI Zhenjiang¹, HE Chengming¹, LI Xiaorong¹, LIANG Yongliang^{2*}

(1. State Grid Jibe Electric Economic Research Institute, Beijing 100038, China; 2. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China)

Abstract: Aiming at improving the transient voltage security of the high-proportion renewable energy sending-end power grid, an optimal configuration method of synchronous condenser was studied. According to the high/low voltage safety ride-through standard of new energy units, a voltage safety evaluation index was established. The candidate installation sites of condenser were chosen optimally. Considering the requirements of transient voltage safety and power transmission of outgoing channels in the sending-end power grid, the capacity optimization model of condenser was constructed, and a solving method for the optimization model using particle swarm algorithm was proposed. By the simulation results in a high-proportion new energy sending-end power system, it was verified that the proposed optimal configuration of condenser could effectively improve the transient voltage security level and reduce the deviation of the transmitted power of the outgoing channel.

Keywords: high renewable penetration level; sending-end power system; configuration of synchronous condenser; transient voltage security; outgoing channel

收稿日期:2022-10-24

基金项目:2022年冀北经研院新能源接入弱送端电网电压稳定及协同控制策略研究资助项目(B3018F220000)

第一作者简介:杨金刚(1982—),男,河北唐山人,高级工程师,博士,主要研究方向为电力系统安全稳定分析和电网规划技术。

E-mail:123225054@qq.com

*通信作者简介:梁永亮(1987—),男,山东烟台人,副研究员,硕士生导师,博士,主要研究方向为电力系统态势感知及故障诊断。

E-mail:liangyl@sdu.edu.cn

0 引言

在能源低碳化转型的进程下,以风电和光伏为代表的新能源大规模持续并网成为我国与世界各国电网发展的主流趋势^[1-2]。其中,作为承担电能输出的送端电网接入新能源的比例显著提高,传统依赖化石能源的火电机组被大量替代,送端电网短路比水平下降,弱送端电网形态逐步呈现,电网调压能力被削弱,该类型电网在故障扰动情况下面临严峻暂态电压安全问题的挑战^[3]。一方面,送端电网中新能源机组因弱抗干扰性、过流能力低等问题,容易在故障扰动后因暂态电压无法安全穿越而发生脱网现象^[4-5],引起后续更严重的电网安全破坏性事故;另一方面,送端电网故障扰动后暂态电压不安全易导致外送传输通道功率偏离故障前所安排的调度值^[6],对供给的外部受电网产生严重的功率冲击,直接影响其他区域电网运行安全。

动态无功补偿装置能够在故障扰动后进行电压支撑^[7-8],对防止电网暂态电压失稳具有重要价值。为发挥动态无功补偿装置对电网电压的支撑作用,需提前优化部署动态无功补偿装置的安装站点和配置容量,即为动态无功补偿装置的选址和定容问题。本研究将针对高比例新能源送端电网面临的暂态电压安全问题,研究动态无功补偿装置的优化选址和定容方法。

文献[9-11]面向电网中静态电压安全性问题,以减少电网电压偏差、运行成本和网络损耗等为目标,提出了无功优化配置模型及其相应解算方法,但无法有效指导针对暂态电压安全问题的动态无功规划配置。针对提高暂态电压安全性的动态无功规划,文献[12]以传统电网为对象,研究了以延长暂态电压失稳对应的极限切除时间为目标的静止同步补偿器 STATCOM 选址方法。文献[13]考虑夏季用电高峰时感应电动机动态负荷影响作用,提出了基于轨迹灵敏度的静止无功补偿器(static var compensator, SVC)、STATCOM 的无功补偿装置选址方法。文献[12-13]中均没有涉及对动态补偿容量的具体优化。文献[14]针对传统电网,以工程中电压跌落 $U_{pu}=0.75$ 持续 1 s 为失稳判据,提出了考虑暂态电压失稳风险最小的 SVC 补偿成本最优的无功规划方案。文献[15]在通过轨迹灵敏度优选 STATCOM 安装位置基础上,建立了暂态电压失稳风险最小和 STATCOM 安装成本最小的多目

标优化模型,提出基于遗传算法的模型求解方法。文献[14-15]针对传统电网模型进行动态无功规划配置,未考虑新能源接入后电网的暂态电压特性,适用性需进一步探究。

针对含新能源电网的动态无功规划,文献[16]在分析大规模新能源直流外送系统暂态过电压发生的诱导因素下,基于时域仿真给出了调相机配置方案,但缺乏对调相机选址和定容的具体优化。文献[17]提出了基于电压二元表的暂态电压安全裕度指标用于指导无功补偿站点选择,建立了考虑 SVC 和 STATCOM 差异化的动态无功补偿优化模型,提高了含高渗透率风光的电网暂态电压稳定性。文献[18]提出了针对调相机优化配置的弱送端电网暂态电压稳定水平提升方法,建立了综合调相机配置容量和紧急控制代价最小的优化模型。文献[17-20]虽然在仿真过程中计及了新能源,但在无功规划过程中未考虑新能源机组自身对暂态电压的响应特性及其电压安全穿越的要求。

本研究针对高比例新能源送端电网暂态电压安全性提升,研究以调相机为动态无功装置的选址和定容优化配置方法,以提高故障扰动下新能源机组暂态电压安全穿越能力并减少外送传输通道功率偏差。首先,结合新能源机组暂态高/低压安全穿越标准,建立了暂态电压安全评估指标;其次,通过暂态电压安全评估指标提出了调相机安装站点的优选方法;最后,综合考虑暂态电压安全和外送通道传输功率供给的要求,建立了调相机容量优化配置模型,并提出了应用天牛群算法的模型求解方法。在基于 Nordic 系统修正得到的高比例新能源送端系统中,验证了所提调相机规划配置方法的有效性。

1 新能源系统电压安全标准与评估指标

1.1 暂态电压安全穿越标准

新能源响应特性与系统暂态电压安全水平具有重要关联作用,当电网发生故障电压严重跌落时,新能源机组往往进行无功增发响应,故障清除时因控制时延特性无功增发不能及时撤销,易引发暂态过电压现象。为确保受扰后新能源机组能够进行电压安全穿越,防止机组脱网而引发严重的电网安全破坏性事故,行业制定了相应的新能源机组高/低电压安全穿越标准,规定了新能源机组持续并网的电压条件,该标准通常描述为:在故障后新

能源节点电压需在不同时间段满足规定的电压恢复下边界和上边界要求,电压在可接受的安全范围内过渡到新的运行水平。

目前国家标准和行业标准对新能源故障穿越能力规定了相应的考核标准,根据标准描述的风电场和光伏电站持续并网的高/低电压安全穿越要求,图1中给出了风电场的高/低电压穿越考核标准,其中红色和蓝色虚线分别为高电压和低电压的安全边界,据此,低电压穿越 U_1 要求为:风电场节点电压标幺值跌落至0.2时,需持续并网运行0.625 s,且能够在2 s内高于低电压穿越边界恢复至0.9;高电压穿越 U_2 要求为:风电场节点电压在故障后0.5 s内不应超过1.3,在0.5~1.0 s内不应超过1.25,在1.0~10 s内不应超过1.2。结合图1,受扰后风电场并网电压需在所示电压安全区域内过渡到新的稳态水平。

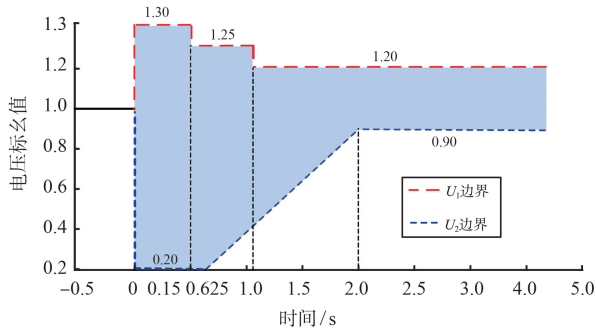


图1 风电场高/低电压安全穿越要求

Fig.1 High/low voltage safe crossing requirements of wind farm

1.2 暂态电压安全评估指标

新能源高/低电压安全穿越要求规定了新能源机组受扰后暂态电压所允许的过渡演变过程,是对暂态电压安全的硬约束,为此,本节将基于新能源电压安全穿越标准,量化暂态时序过程中新能源并网节点电压轨迹偏移程度,并计及电压偏移量时域累积程度,建立基于轨迹的暂态电压安全评估指标

$$K_{\text{VSI}} = \frac{1}{HL} \sum_{i=1}^H \sum_{j=1}^L \Delta V_{ij}, \quad (1)$$

式中: L 为暂态电压关注的时间尺度所对应的的时间断面数; H 为新能源节点总数; ΔV_{ij} 为新能源节点 i 在时刻 j 的电压偏移量,即

$$\Delta V_{ij} = \begin{cases} V_{ij} - V_{\max}, & V_{ij} > V_{\max} \\ V_{ij} - V_{\min}, & V_{ij} < V_{\min} \\ 0, & V_{\min} < V_{ij} < V_{\max} \end{cases}$$

式中, V_{\max} 和 V_{\min} 分别为电压安全穿越标准中规定的高和低电压穿越边界。

K_{VSI} 评估了系统新能源站点整体的暂态电压安

全水平,当新能源站点电压满足安全穿越标准要求时, $K_{\text{VSI}}=0$;当其电压穿越了标准中规定的电压上边界或下边界时 $K_{\text{VSI}}>0$,且数值越大表明暂态电压安全破坏程度越高。

2 提升暂态电压安全性的调相机优化配置方案

2.1 调相机安装节点优选

进行调相机优化配置首先在于确定调相机合适的安装位置,针对含大规模新能源的电力系统,结合所定义的暂态电压安全评估指标,以新能源电压安全穿越能力的提升来指导选取调相机安装节点,具体过程描述如下。

(1) 面向高比例新能源送端电网,构建新能源出力大发、平发和小发的电网运行场景,通过时域仿真确定影响新能源站点暂态电压安全穿越的关键扰动故障集。

(2) 基于所构建的 K_{VSI} 量化不同运行场景下、不同扰动故障下高比例新能源送端电网所有新能源站点的暂态电压安全水平。

(3) 选取固定容量调相机逐一配置于新能源场站母线,计算每个配置位置下不同运行方式、各扰动故障下的电压安全指标(voltage safety index, VSI)。

(4) 定义第 k 个调相机接入位置对送端电网新能源站点整体电压安全水平的提升效果

$$E_k = \frac{\sum_{i=1}^C \sum_{j=1}^F K_{\text{VSI}_{ij,0}} - \sum_{i=1}^C \sum_{j=1}^F K_{\text{VSI}_{ij,k}}}{S_g}, \quad (2)$$

式中, C 和 F 分别为运行场景数和扰动故障数, $K_{\text{VSI}_{ij,k}}$ 和 $K_{\text{VSI}_{ij,0}}$ 分别第 k 个位置接入调相机和不含调相机时对应第 j 个扰动故障第 i 个运行场景的 K_{VSI} , S_g 为接入调相机的容量(此处各新能源场站逐一接入调相机容量一致)。

(5) 对(4)中各个安装位置对应的提升效果 E_k 进行排序,数值越大表明在该位置接入调相机对提升暂态电压安全水平越有价值,选取排序前 N 个位置作为调相机的安装节点。

2.2 调相机容量优化模型

针对高比例新能源送端电网,综合考虑暂态电压安全水平和保障外送通道传输供给能力,优化调相机容量的配置,使得在满足新能源电压安全穿越要求前提下,最小化调相机的配置容量,所构建的优化模型表达如下。

目标函数

$$J = \min \left[\frac{1}{FC} \sum_{j=1}^C \sum_{j=1}^F \left(\sum_r^N S_r + \rho_{ij} + \sum_z^Z |P_{ij,z} - P_{i0,z}| \right) \right], \quad (3)$$

式中,

$$\rho_{ij} = \begin{cases} 0, & K_{\text{vst}_{ij}} = 0 \\ M(1 + K_{\text{vst}_{ij}}), & K_{\text{vst}_{ij}} > 0 \end{cases} \circ$$

约束条件为:

$$\begin{cases} P_i = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}), & i = 1, 2, \dots, n \\ Q_i = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}), & i = 1, 2, \dots, n \end{cases}, \quad (4)$$

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = f(x, y, t) \\ 0 = g(x, y) \end{cases}, \quad (5)$$

$$S_{r,\min} \leq S_r \leq S_{r,\max}, \quad (6)$$

式(3)中, S_r 为需优化的第 r 个站点调相机容量, ρ_{ij} 为用于满足第 i 个运行场景第 j 个扰动场景下暂态电压安全要求所设置的惩罚函数, M 为取值为正的大数, Z 为电网的外送通道数, $P_{ij,z}$ 为第 z 个外送通道对应场景和扰动故障下通道传输功率, $P_{i0,z}$ 为第 z 个外送通道场景 i 下未发生故障时的传输功率。式(4)为配置的调相机应能满足稳态时潮流平衡的约束, V_i 和 V_j 分别为节点 i 和 j 的电压, G_{ij} 和 B_{ij} 分别为节点导纳矩阵 (i,j) 位置的实部和虚部, θ_{ij} 为节点间的相位差, n 为电网节点总数, P_i 和 Q_i 为节点的有功和无功注入功率。式(5)为需满足的系统动态过程中微分-代数方程数值可解性约束, x 为动态元件状态变量(例如,发电机转速), y 为系统代数变量(例如,母线电压和线路功率), t 为动态过程时间,式(5)用于时域计算获取新能源场站节点动态过程电压轨迹和外送通道传输功率。式(6)为调相机的容量约束, $S_{r,\min}$ 和 $S_{r,\max}$ 分别节点 r 配置调相机容量的上下限约束。

式(3)~(6)构成了调相机容量优化配置模型,该模型为计及电网复杂动态微分-代数方程的非线性参数优化问题,难以应用经典的数学规划方法进行求解,为此,接下来本研究将利用群体智能的天牛群优化算法对该模型进行求解,获取调相机的配置容量。

2.3 天牛群算法求解调相机配置容量

天牛群优化算法作为一种新颖的优化算法,有

机结合了天牛须算法^[21]和粒子群算法^[22]的寻优优势,具有效率高、鲁棒性好和易于扩展等优点,应用于传统基于数学规划、梯度下降等方法难以有效解决的复杂非线性非凸优化问题。本研究采用天牛群优化算法对2.2节中构建的优化模型进行求解,初始化天牛质点通过蒙特卡洛随机抽样获取,并在优化迭代过程中引入惯性权重自适应调整策略改进天牛群寻优过程。对于天牛数为 N_p 的天牛群中第 i 个天牛位置(对应调相机的容量)中第 j 个元素,第 $(\kappa+1)$ 次迭代中速度 $V_{i,j}^{\kappa+1}$ 和位置 $X_{i,j}^{\kappa+1}$ 为

$$V_{i,j}^{\kappa+1} = \omega^\kappa V_{i,j}^\kappa + c_1^\kappa r_1 (p_{i,j}^\kappa - X_{i,j}^\kappa) + c_2^\kappa r_2 (g_j^\kappa - X_{i,j}^\kappa), \quad (7)$$

$$X_{i,j}^{\kappa+1} = X_{i,j}^\kappa + \lambda V_{i,j}^{\kappa+1} + (1-\lambda) \xi_{i,j}^\kappa, \quad (8)$$

式中, $p_{i,j}^\kappa$ 为天牛 i 在第 κ 次迭代时个体历史最优位置对应的第 j 个元素, g_j^κ 为迭代时全局最优位置对应的第 j 个元素, r_1 和 r_2 为 $[0,1]$ 范围内的随机数, ω^κ 为惯性权重。

$$\omega^{\kappa+1} = \omega_{\max} - \frac{\kappa+1}{\kappa_{\max}} (\omega_{\max} - \omega_{\min}), \quad (9)$$

$$c_1^{\kappa+1} = 2 \sin^2 \left(\frac{\pi (\kappa_{\max} - (\kappa+1))}{2\kappa_{\max}} \right), \quad (10)$$

$$c_2^{\kappa+1} = 2 \sin^2 \left(\frac{\pi (\kappa+1)}{2\kappa_{\max}} \right), \quad (11)$$

式中, ω_{\max} 和 ω_{\min} 为最大和最小权重, $c_1^{\kappa+1}$ 和 $c_2^{\kappa+1}$ 分别为自我和群体学习因子, κ_{\max} 为最大允许迭代次数, λ 为一个正常数, $\xi_{i,j}^\kappa$ 为天牛的位置增量因子。

第 $\kappa+1$ 次迭代中天牛的位置增量因子更新,即

$$\xi_{i,j}^{\kappa+1} = \delta^\kappa V_{i,j}^\kappa \text{sign}(f(X_{r,i,j}^\kappa) - f(X_{l,i,j}^\kappa)), \quad (12)$$

$$\delta^\kappa = \eta_\delta \delta^{\kappa-1}, \quad (13)$$

$$X_{r,i,j}^\kappa = X_{i,j}^{\kappa-1} + \frac{d}{2} V_{i,j}^{\kappa-1}, \quad (14)$$

$$X_{l,i,j}^\kappa = X_{i,j}^{\kappa-1} - \frac{d}{2} V_{i,j}^{\kappa-1}, \quad (15)$$

式中, δ^κ 为第 κ 次迭代的搜索步长, $\text{sign}(\cdot)$ 为符号函数, $X_{l,i,j}^\kappa$ 、 $X_{r,i,j}^\kappa$ 分别为天牛左、右两须的位置, $f(X_{l,i,j}^\kappa)$ 、 $f(X_{r,i,j}^\kappa)$ 分别为天牛左、右两须的适应度值, η_δ 为变步长因子, d 为天牛左右两须的间距。

利用时域仿真计算天牛的适应度(目标函数值),通过式(7)~(15)迭代计算,迭代更新天牛全局最优位置,由最佳位置确定各调相机的配置容量。

面向高比例新能源送端电网暂态电压安全水平提升的调相机优化配置流程见图2所示。



图2 调相机优化配置流程

Fig.2 Optimization configuration process of condenser

3 算例分析

3.1 算例描述

将通过修改后的北方送端系统作为算例验证本文所提调相机优化配置方法的有效性^[23],以Nordic系统中作为功率外送的北方送端和等效外部区域电网为对象,除保留等效外部区域g20机组为同步平衡节点机组,其他原11台同步机组均置换为等出力水平的双馈机组风电场,构成含高比例新能源的送端电网系统。整个系统共包含22条线路、24台变压器、8个负荷,含有2条外送通道,如图3所示,网络模型参数参考文献[23]。在此基础上,考虑新能源大发、平发(原有出力水平)和

小发三种状态,设置三种基本运行场景。考虑对送端电网暂态电压安全影响较大并影响传输通道功率传输能力的外送通道处故障为预想事故,分别设置外送通道1和2处所在母线4031和4032发生三相短路故障,根据所考虑的运行场景和故障扰动进行调相机选址、定容优化配置,算例仿真在MATLAB仿真平台中进行。

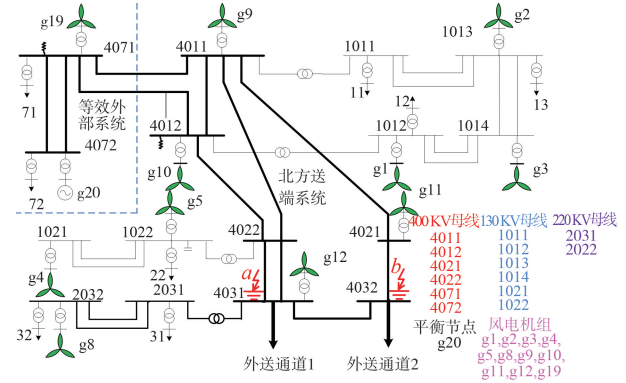


图3 含高比例新能源送端电网

Fig.3 Sending end power grid with high proportion of new energy

3.2 未配置调相机时系统暂态电压特性

未配置调相机时,发生外送通道1和2所在母线发生三相短路且故障持续0.35s,考虑图1中风电场的高/低电压穿越标准,送端电网中风电机组母线电压和外送传输通道功率分别由图4、5所示。其中,纵坐标处 $U_a^* \sim U_f^*$, $P_a^* \sim P_f^*$ 分别表示场景a~f下各新能源场站电压和传输通道功率的标么值。

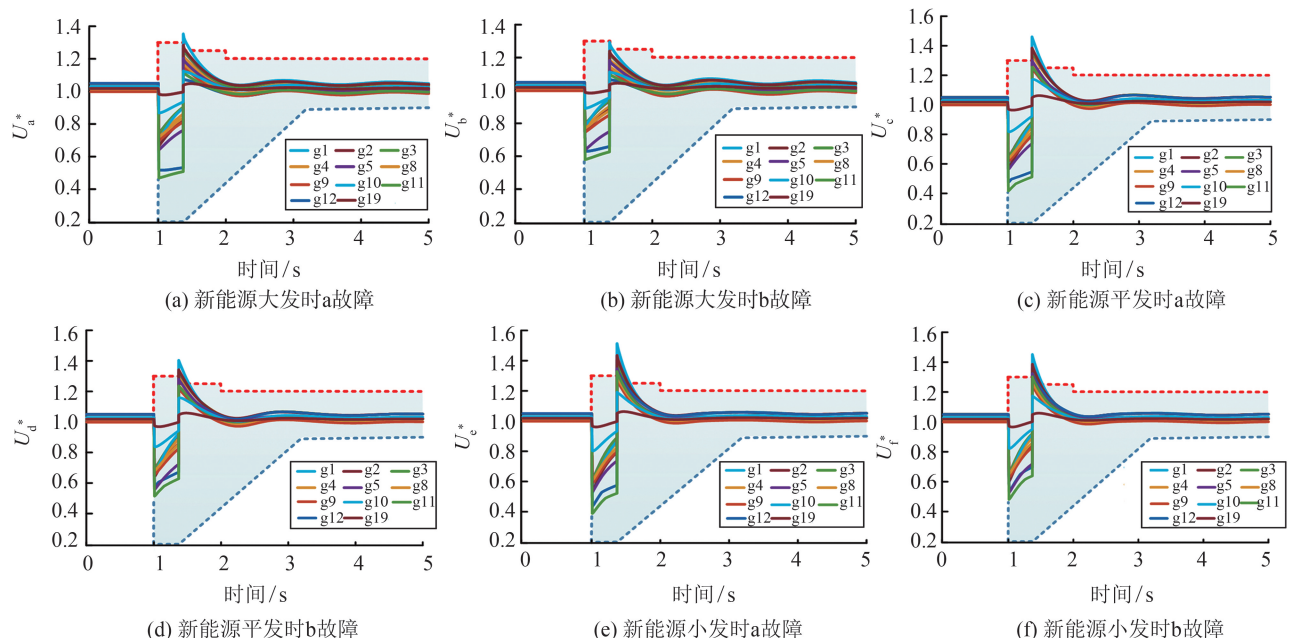


图4 未配置调相机时风电机组母线电压轨迹

Fig.4 Wind turbine generator bus voltage trajectory without condenser

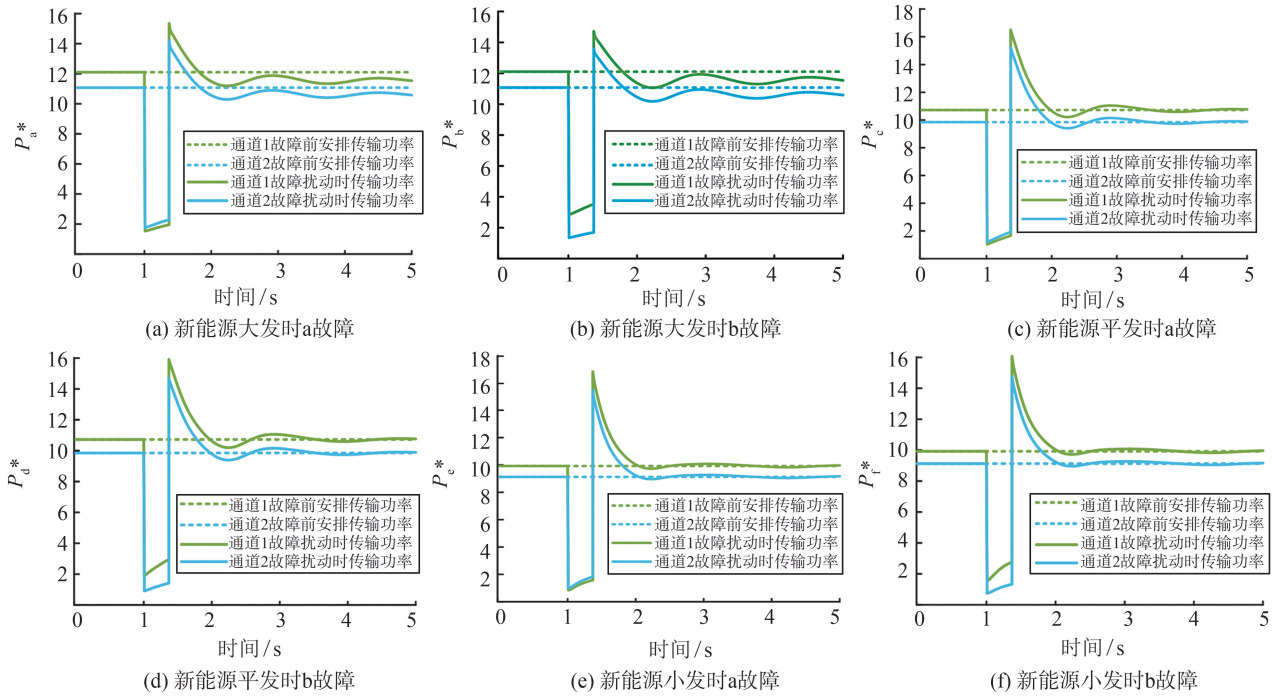


图5 未配置调相机时传输通道功率

Fig.5 Transmission channel power when condenser is not configured

在不同运行方式下外送通道故障均引发了送端电网风电机组母线出现暂态过电压现象,主要原因在于风机故障低电压期间,无功电流增多,故障清除后,电网电压迅速恢复,但控制系统时延特征导致机组仍提供无功支撑,出现暂态过电压问题。故障期间电压跌落越大,故障清除时暂态过电压越突出,风电机组电压难以保障安全穿越,易导致风电机组脱网事故;同时,外送通道传输功率与原有安排的功率在故障清除后一段时间内产生了较大的偏移,对所馈入的受端电网也造成功率冲击问题。由此可见,在未配置调相机时,送端电网在外送通道故障时功率传输能力下降,风电机组不满足电压安全穿越标要求。

3.3 调相机安装站点选取

基于2.1节中所提出的方法进行调相机安装站点选择,通过逐一在风电场站母线处安装50 MVar的调相机得到在所给三种运行场景和两种外送故障下的送端电网风电场整体电压安全提升效果 E_k 并进行大小排序,结果如表1所示。表1中提升效果为正;表明在那些母线处安装调相机能够改善暂态电压安全性;提升效果为负,表明在相应节点安装调相机会恶化暂态电压安全性。本文选取 E_k 最大的前5个母线1022、2032、4012、4011和1021作为调相机安装站点。

表1 不同调相机安装站点电压安全提升效果

Table 1 Safety improvement effect of voltage at different condenser installation sites

安装母线	E_k	安装母线	E_k
1022	3.33	4011	2.60
1012	1.17	4012	2.68
1013	2.02	4021	0.08
1021	2.23	4031	-0.12
1014	2.22	4071	-0.22
2032	3.08		

3.4 调相机容量优化配置效果

在确定调相机安装节点下,通过应用天牛群算法对2.2节中构建的调相机优化配置模型进行求解,天牛群算法优化中相关参数取值为: $N_p = 20$, $\kappa_{\max} = 30$, $\omega_{\max} = 0.9$, $\omega_{\min} = 0.4$, $\lambda = 0.4$, $\eta_{\delta} = 0.95$, $d = 0.5$, $\delta_0 = 0.5$,通过进行多次天牛群优化计算,确定的各母线调相机安装容量分别为:母线1022处调相机215 MVar,母线2023处调相机180 MVar,母线4012处调相机175 MVar,母线4011处调相机220 MVar和母线1021处调相机50 MVar。在所给容量配置下送端电网不同运行方式和故障场景下风电场母线电压轨迹和传输通道功率分别如图6和7所示,其中,纵坐标处 $U_A^* \sim U_F^*$, $P_A^* \sim P_F^*$ 分别表示场景a~f下各新能源场站电压和传输通道功率的标幺值。

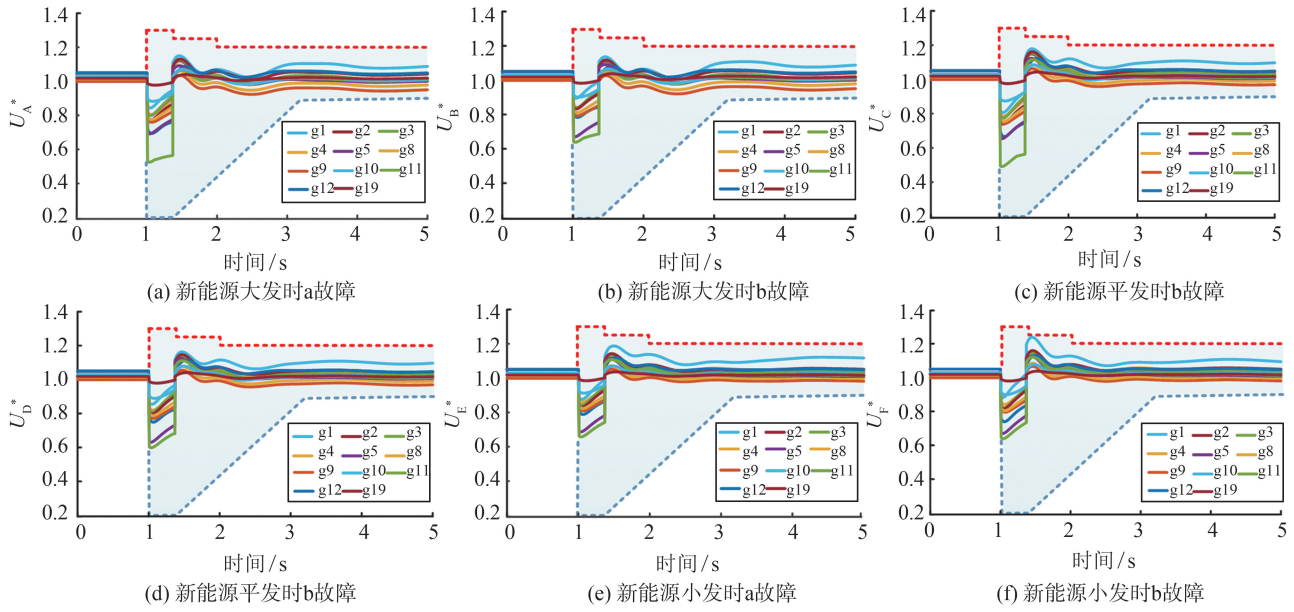


图6 优化配置调相机时风电机组母线电压轨迹

Fig.6 Bus voltage trajectory of wind turbine generator in optimal configuration of condenser

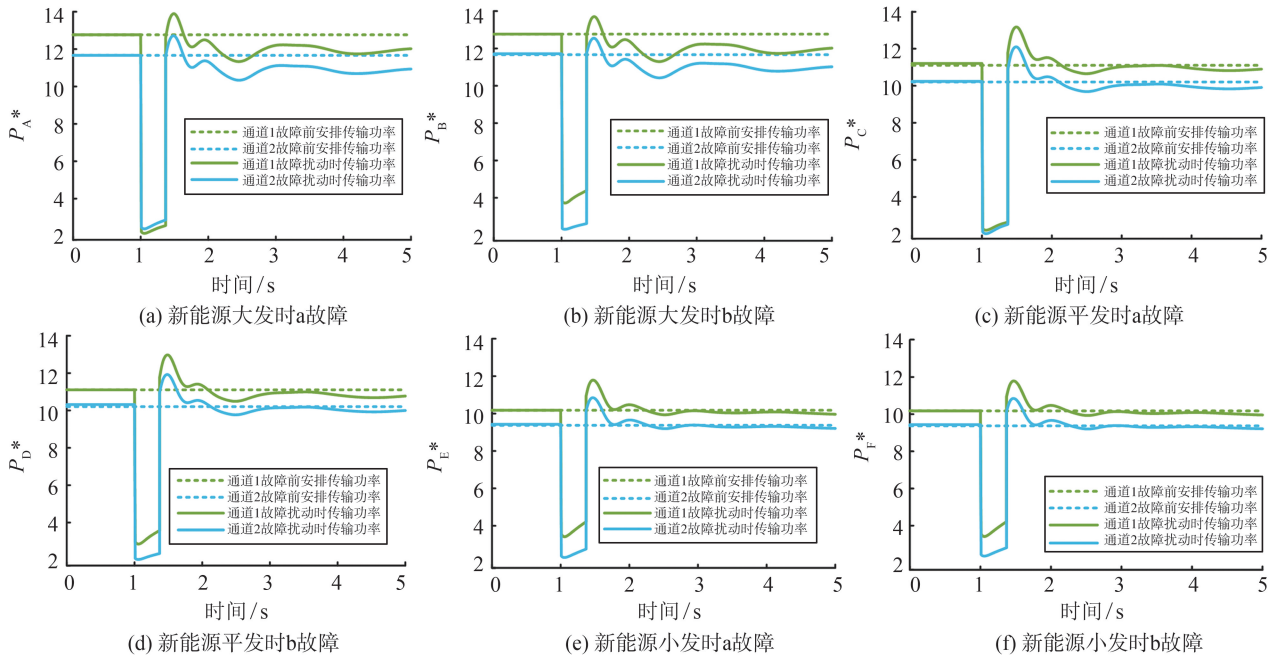


图7 优化配置调相机时传输通道功率

Fig.7 Transmission channel power in optimal configuration of condenser

从图6中可以看出,在优化配置调相机后,不同运行方式下传输通道故障时风电机组母线电压均能满足电压安全穿越标准要求,运行于所允许的电压安全范围内,能够避免风电机组脱网事故的发生,同时避免暂态过电压对其他不同设备带来的不利影响。相较于图5,图7说明了在优化配置调相机后能够显著减少故障后传输功率与原有安排的功率之间的偏移,提高了外送通道供电的平稳性,减少对受电网的冲击性。仿真结果验证了本研究所提调相机优化配置方法能够有效提高送端电

网暂态电压安全水平并减少故障后外送传输通道功率与所安排的传输功率的偏差。

4 结论

本研究面向高比例新能源送端电网,提出了以提升送端暂态电压安全水平为目标的新能源场站调相机优化配置方法,提出了基于风电机组高/低电压安全穿越为标准的暂态电压安全水平评估指标并据此优选了调相机安装站点,构建了同时兼顾

暂态电压安全水平和送端电网外送功率平稳需求的调相机容量优化配置模型,提出了应用变惯性权重牛群算法进行模型求解以得到调相机安装容量,在高比例新能源送端电网的仿真算例中,验证了所提调相机优化配置方案能够有效控制外送通道故障时风电机组电压满足高/低电压安全穿越标准的要求,并减少了故障扰动时外送通道传输功率偏差,对降低外送传输通道功率冲击和防止风电机组脱网事故具有重要价值。

参考文献:

- [1] 石文辉,屈姬贤,罗魁,等.高比例新能源并网与运行发展研究[J].中国工程科学,2022,24(6):52-63.
SHI Wenhui, QU Jixian, LUO Kui, et al. Grid-integration and operation of high-proportioned new energy [J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(6): 52-63.
- [2] CARRASCO J M, FRANQUELO L G, BIALASIEWICZ J T, et al. Power-electronic systems for the grid integration of renewable energy sources: a survey[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(4): 1002-1016.
- [3] 屠竞哲,潘艳,訾鹏,等.功角失稳与暂态过电压并存型锡盟交直流弱送端系统特性分析[J].电网技术,2021,45(4):1496-1506.
TU Jingzhe, PAN Yan, ZI Peng, et al. Ximeng AC/DC weak sending-side system characteristics with angle instability and transient overvoltage[J]. Power System Technology, 2021, 45(4):1496-1506.
- [4] 甄永赞,苏宁赛,李美林.适用于高/低电压穿越的双馈风机协同控制策略及其稳定技术研究[J].电网技术,2021,45(1):39-49.
ZHEN Yongzan, SU Ningsai, LI Meilin. Research on doubly-fed induction generators synergetic control strategy and stability technology for high/low voltage ride through [J]. Power System Technology, 2021, 45(1):39-49.
- [5] 孙华东,于琳,赵兵.基于暂态过电压约束的新能源并网系统电压支撑强度量化分析方法[J].中国电机工程学报,2023,43(11):4207-4218.
SUN Huadong, YU Lin, ZHAO Bing. Quantitative analysis of system strength of renewable energy generation grid-connected system based on transient overvoltage constraint [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(11): 4207-4218.
- [6] 申家锴,刘洋,李卫东,等.考虑频率与区间联络线功率安全约束的两区互联电力系统机组组合[J].电力自动化设备,2022,42(11):167-175.
SHEN Jiakai, LIU Yang, LI Weidong, et al. Unit commitment considering safety constraints of frequency and inter-areal tie-line power in two-area interconnected power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(11):167-175.
- [7] 金一丁,于钊,李明节,等.新一代调相机与电力电子无功补偿装置在特高压交直流电网中应用的比较[J].电网技术,2018,42(7):2095-2102.
JIN Yiding, YU Zhao, LI Mingjie, et al. Comparison of new generation synchronous condenser and power electronic reactive-power compensation devices in application in UHV DC/AC grid [J]. Power System Technology, 2018, 42(7):2095-2102.
- [8] 陆超,崔文进,李红军,等.京沪穗电网暂态电压稳定问题与STATCOM应用[J].电力系统自动化,2004,28(11):9-12.
LU Chao, CUI Wenjin, LI Hongjun, et al. Problems and solutions of transient voltage stability in load centers of China[J]. Automation of Electric Power System, 2004, 28(11):9-12.
- [9] 张粒子,舒隽,林宪枢,等.基于遗传算法的无功规划优化[J].中国电机工程学报,2000,20(6):6-9.
ZHANG Lizi, SHU Jun, LIN Xianshu, et al. Reactive power planning based on genetic algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(6):6-9.
- [10] 严艺芬,吴文宣,张逸,等.考虑主动管理措施的配电网无功补偿双层优化配置[J].电力系统保护与控制,2017,45(12):60-66.
YAN Yifen, WU Wenxuan, ZHANG Yi, et al. Bi-level optimal allocation of reactive power compensation considering active management measure [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(12):60-66.
- [11] 张海鹏,林舜江,刘明波.考虑光伏不确定性的低压配电网分散无功补偿鲁棒优化配置[J].电网技术,2016,40(12):3880-3888.
ZHANG Haipeng, LIN Shunjiang, LIU Mingbo. Robust optimal allocation of reactive power compensation in low voltage distribution networks considering uncertainty of photovoltaic generation [J]. Power System Technology, 2016, 40(12):3880-3888.
- [12] 袁志昌,刘文华,宋强.基于暂态电压稳定指标的动态无功优化配置方法[J].电力系统自动化,2009,33(14):17-21.
YUAN Zhichang, LIU Wenhua, SONG Qiang. Optimal allocation method of dynamic Var compensation based on transient voltage stability index [J]. Automation of Electric Power System, 2009, 33(14):17-21.
- [13] SAPKOTA B, VITTAL V. Dynamic VAR planning in a large power system using trajectory sensitivities [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 25(1): 461-469.
- [14] 周仕豪,唐飞,刘涤尘,等.考虑降低暂态电压失稳风险的动态无功优化配置方法[J].电力系统保护与控制,2018,46(7):68-75.
ZHOU Shihao, TANG Fei, LIU Dichen, et al. A dynamic VAR optimal configuration method for reducing the risk of transient voltage instability [J]. Power System

- Protection and Control, 2018, 46(7):68-75.
- [15] XU Yan, DONG Zhaoyang, MENG Ke, et al. Multi-objective dynamic VAR planning against short-term voltage instability using a decomposition-based evolutionary algorithm [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(6): 2813-2822.
- [16] 索之闻, 刘建琴, 蒋维勇, 等. 大规模新能源直流外送系统调相机配置研究[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(9):124-129.
- SUO Zhiwen, LIU Jianqin, JIANG Weiyong, et al. Research on synchronous condenser configuration of large-scale renewable energy DC transmission system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9): 124-129.
- [17] 徐艳春, 蒋伟俊, 汪平, 等. 考虑暂态电压稳定的含高渗透率风光的电网动态无功规划方法[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(8):79-88.
- XU Yanchun, JIANG Weijun, WANG Ping, et al. Dynamic reactive power planning method for power grid with high permeability wind power and photovoltaic considering transient voltage stability [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(8):79-88.
- [18] 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.
- [19] 花赟明, 吴琛, 黄伟, 等. 考虑风电低电压穿越过程的频率最低点量化及其提升方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(1):126-134.
- HUA Yunyue, WU Chen, HUANG Wei, et al. Quantification and enhancement method for frequency nadir considering low voltage ride-through process of wind Power [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(1):126-134.
- [20] 高正, 王世荣, 丁恒. 浅论光伏电站无功补偿工程应用[J]. 山东工业技术, 2019, 282(4):190-191.
- GAO Zheng, WANG Shirong, DING Heng. Application of reactive power compensation in photovoltaic power plant [J]. Shandong Industrial Technology, 2019, 282(4):190-191.
- [21] JIANG Yufeng, WANG Shuqing, LI Yingchao. Localizing and quantifying structural damage by means of a beetle swarm optimization algorithm [J]. Advances in Structural Engineering, 2021, 24(2):370-384.
- [22] SHI Yuhui. Particle swarm optimization [J]. IEEE Connections, 2004, 2(1):8-13.
- [23] YANG Hao, LI Ning, SUN Zhenglong, et al. Real-time adaptive UVLS by optimized fuzzy controllers for short-term voltage stability control [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 37(2): 1449-1460.

(编辑:陈丽萍)

(上接第162页)

- [11] 王江营, 曹文贵, 翟友成. 深海沉积物与履带相互作用试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊2): 274-278.
- WANG Jiangying, CAO Wengui, ZHAI Youcheng. Experimental study on the interaction between deep-sea sediments and tracks [J]. Geomechanics, 2011, 32(Suppl. 2):274-278.
- [12] 李力, 吕敬科. 基于颗粒流理论的深海沉积物剪切特性模拟研究[J]. 矿冶工程, 2017, 37(6): 1-6.
- LI Li, LÜ Jingke. Simulation study on shear characteristics of deep-sea sediments based on particle flow theory [J]. Mining and Metallurgy Engineering, 2017, 37(6):1-6.
- [13] 于彦江, 段隆臣, 王海峰, 等. 西太平洋深海沉积物的物理力学性质初探[J]. 矿冶工程, 2016, 36(5): 1-4.
- YU Yanjiang, DUAN Longchen, WANG Haifeng, et al. Preliminary study on physical and mechanical properties of deep-sea sediments in the western Pacific [J]. Mining and Metallurgy Engineering, 2016, 36(5):1-4.
- [14] 曾谊晖. 履带式集矿车软底质行走行为及模拟试验系统研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
- ZENG Yihui. Study on soft sediment walking behavior and simulation test system of tracked mining vehicle [D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [15] 李力, 李庶林. 深海表层海泥模拟及地面力学特性研究[J]. 工程力学, 2010, 27(11):213-220.
- LI Li, LI Shulin. Study on simulation of deep-sea surface mud and ground mechanical properties [J]. Engineering mechanics, 2010, 27(11):213-220.
- [16] 张克健. 车辆地面力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- ZHANG Kejian. Vehicle ground mechanics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002.
- [17] WONG J Y, PRESTON-THOMAS J. On the characteristics of the shear stress-displacement relationship of terrain [J]. Journal of Terramechanics, 1983, 19(4): 225-234.

(编辑:陈丽萍)