

含高比例风电的送端电网两阶段式暂态电压安全预防控制

何成明¹, 万忠杨¹, 单体华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:为提升风电消纳能力和电压支撑能力,面向含高比例风电场的送端电网研究风机和储能协调的两阶段式暂态电压安全控制策略。第一阶段以储能和风机的功率控制代价最小为目标,构建电网稳态阶段潮流优化模型,运用内点法进行模型优化求解,确定最优稳态运行点;第二阶段考虑电网暂态电压安全约束,以偏离稳态优化后的潮流运行点程度最小为目标,建立暂态电压安全预防控制优化模型,应用灰狼优化算法求解,进行潮流运行点的优化校正。通过对修改后的Nordic含高比例风电场的送端电网进行仿真,验证所提两阶段式预防控制策略能够有效提高风电消纳能力和暂态电压安全预防控制水平。

关键词:高比例风电场;储能;风电消纳;暂态电压安全;协调控制

中图分类号:TM712

文献标志码:A

引用格式:何成明,万忠杨,单体华,等.含高比例风电的送端电网两阶段式暂态电压安全预防控制[J].山东大学学报(工学版),2024,54(6):121-129.

HE Chengming, WAN Zhongyang, SHAN Tihua, et al. Two-stage transient voltage safety prevention and control of sending-end power grid with high-proportion of wind power[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2024, 54(6):121-129.

Two-stage transient voltage safety prevention and control of sending-end power grid with high-proportion of wind power

HE Chengming¹, WAN Zhongyang¹, SHAN Tihua¹, LIANG Yongliang²

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

Abstract: To improve wind power absorption capacity and voltage support capacity, a two-stage transient voltage safety control strategy for wind power and energy storage coordination was studied for the sending-end power system with high renewable penetration level. In the first stage, the power flow optimization model of the power grid in the steady state stage was constructed with the goal of minimizing the cost of energy storage and wind power control. The interior point method was used to optimize the model and determine the optimal steady state operating point. In the second stage, considering the safety constraints of power grid transient voltage, a transient voltage safety prevention and control optimization model was established to minimize the degree of power flow operating point after steady-state optimization, and grey wolf optimization algorithm was applied to solve the problem and optimize the power flow operating point. Through the simulation of the modified Nordic power grid with high proportion wind farms, the proposed two-stage preventive control strategy could effectively improve the system's wind power absorption capacity and transient voltage safety preventive control level.

Keywords: high proportion wind farm; energy storage; wind power consumption; transient voltage safety; coordinated control

0 引言

近年来,随着“双碳”政策和构建新型电力系统

战略目标的提出,我国风力发电得到了迅猛发展^[1-2],风电机组在送端电网中的装机比例显著提高。然而,风电机组的大规模接入导致送端电网的经济安全运行面临严峻挑战。一方面,风力资源的

收稿日期:2023-08-02

基金项目:国网冀北经研院2023年考虑灵活性需求的“双高”电力系统网源协同规划技术研究资助项目(B3018F23000B)

第一作者简介:何成明(1986—),男,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:sduhcm@163.com

*通信作者简介:梁永亮(1987—),男,副教授,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

随机波动性及不可存储性,使以传统发电机确定性跟踪的平衡机制无法适用,破坏了系统的电力电量平衡,系统控制成本增加,并且风电场的安装维护成本较高,电网运行的经济性降低。当系统中拥有的灵活性资源不足,风电机组的发电利用率会降低,导致电网局部消纳困难^[1,3]。另一方面,风电机组的无功控制能力弱,大规模接入电网后风电场电压支撑能力下降,受扰后发生暂态电压失稳的风险将会极大提高,并且风电机组对电压变化较为敏感,电压越限会使机组脱网,造成严重的电压安全问题^[4-5]。

为提升送端电网的风电消纳能力及暂态电压安全水平,常用方法是对电网进行适当的无功补偿。储能作为一种热门的灵活性资源,尤其是电化学储能,可以辅助电网调压,是提升风电消纳和电压支撑能力的重要装置^[6]。通过合理调控储能的有功无功出力,能够有效改善暂态电压安全问题。

为解决新能源消纳问题,文献[7]构建了以运行投资成本最小为目标的电池储能分层优化模型,通过对储能进行优化配置促进新能源消纳;文献[8]提出考虑新能源消纳的共享储能电站容量功率配置方法,以经济性为目标建立双层规划模型,促进新能源消纳。在面向储能的潮流优化上,文献[9]以降低电网有功损耗和改善电压水平为目标,提出含储能系统的潮流优化策略;文献[10]建立储能和新能源的等面积原理优化模型,实现新能源特性、消纳目标、储能配置、系统平衡的四维有机统一;文献[11]以含液流电池储能的光伏系统为研究对象,考虑初投资与全寿期运行成本设计优化局部调度策略。

为解决暂态电压安全问题,文献[12]提出一种适用于动态无功源优化配置的两阶段方法,兼顾电压稳定与经济性;文献[13]提出一种降低暂态电压风险的动态无功补偿装置优化配置方法,同时使安装成本最小化;文献[14]基于新能源多场站短路比提出提升电压支撑强度的调相机配置方法,调相机配置容量显著降低。上述方法都是通过对无功补偿装置或调相机进行选址定容优化提升电压支撑能力。文献[15]提出基于灵敏度分析提升暂态电压支撑的储能和光伏协调控制方法,降低储能光伏脱网风险;文献[16]基于传统的电压型换流器控制研究,通过增加一阶暂态电压方程,在 dq 坐标系中建立主动支撑的新能源机组控制方案,能够显著提高电压的支撑能力;文献[17-18]深入研究了分布式

可再生能源的无功调节机理,在此基础上提出相应的控制方案。上述方法通过对系统电压进行控制,提高电压支撑能力。

综上所述,现有文献鲜有研究同时计及风电消纳和暂态电压安全的储能与风机协调控制策略。本研究针对含高比例风电场送端电网的风电消纳和暂态电压安全问题,提出一种含高比例风电场送端电网的两阶段式暂态电压安全预防控制策略。以储能和风机功率控制代价最小为目标,对含高比例风电场的送端电网进行最优潮流调控;建立以偏离稳态优化后潮流运行点的程度最小为目标,满足高/低暂态电压安全标准的预防控制优化模型,对稳态潮流最优运行点进行修正;在基于修改后的Nordic高比例风电场送端系统中,验证所提储能和风机协调控制策略的有效性。

1 两阶段式风机与储能协同控制方案

随着风电机组在送端电网中的占比逐渐提高,电网的风电消纳能力和电压支撑能力下降。为此,本研究提出一种针对含高比例风电场送端电网的两阶段式暂态电压安全预防控制策略。第一阶段为稳态潮流优化,以储能和风机功率控制代价最小为目标,对含高比例风电场的送端电网进行最优潮流调控;第二阶段为暂态电压安全预防控制优化,以偏离潮流运行点的程度最小为目标,指导修正稳态优化后的潮流运行点。两阶段式控制技术整体流程如图1所示。

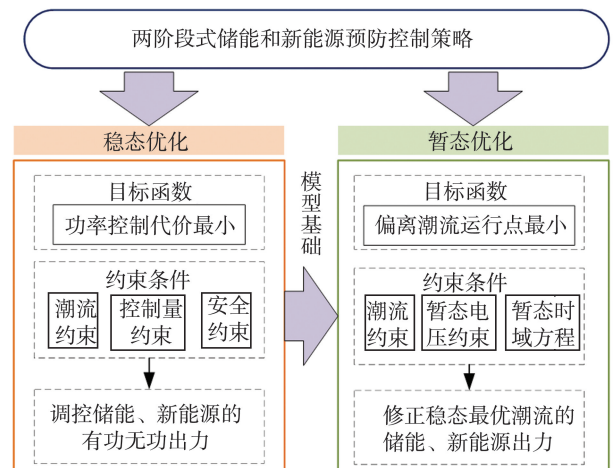


图1 两阶段式控制技术整体流程

Fig.1 Overall process of two-stage control technology scheme

为实现含高比例风电场送端电网的控制策略,送端电网潮流运行点 o_{pi} 需要满足潮流约束;基于风

电出力消纳最大化进行稳态潮流优化,寻找满足稳态潮流约束条件的最优潮流解 o_{p2} ;基于高/低电压穿越要求进行暂态电压安全预防控制优化,得出潮流运行点 o_{p^*} 。经过3次优化,使含高比例风电场的送端电网能以最小的控制代价促进风电消纳最大化,满足暂态电压安全穿越要求。预防控制技术对应的运行点演变过程如图2所示。

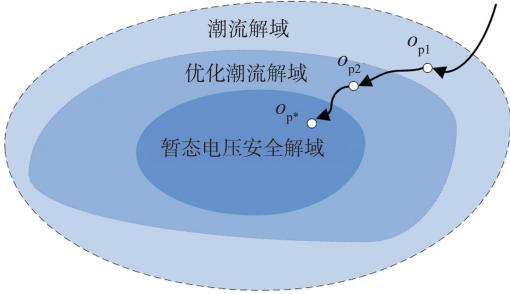


图2 两阶段式控制策略的潮流解域图
Fig.2 Power flow solution domain diagram of two-stage control strategy

2 稳态潮流优化阶段风机和储能的协同控制

2.1 稳态潮流优化模型的构建

针对稳态潮流优化阶段的风机与储能协同控制问题,本研究以储能和风机功率控制代价最小为目标,在满足送端电网潮流、控制量约束、安全约束及储能运行约束的前提下,构建稳态潮流优化模型,目标函数

$$\min \{ \Delta P_G W_{pG} \Delta P_G^T + \Delta P_{st} W_{pst} \Delta P_{st}^T + \Delta Q_G W_{qG} \Delta Q_G^T + \Delta Q_{st} W_{qst} \Delta Q_{st}^T \}, \quad (1)$$

式中, ΔP_G 、 ΔQ_G 为风机有功、无功出力的变化向量, ΔP_{st} 、 ΔQ_{st} 为储能有功、无功出力的变化向量, W_{pG} 、 W_{pst} 、 W_{qst} 和 W_{qG} 为风机有功改变量、储能有功调控量、储能无功调控量和风机无功改变量对应权重系数。目标函数从风电场有功、无功控制量和储能有功、无功改变量4个方面综合考虑潮流的优化调控。

为最大化消纳风电出力、减少弃风,储能权重系数 W_{pst} 、 W_{qst} 要远大于风机调控量权重系数 W_{pG} 、 W_{qG} , 以实现优先调节储能应对风电的波动性。当储能资源耗尽,可适当调整新能源出力。

稳态潮流优化需满足送端电网的运行约束条件及储能运行约束条件。

(1) 潮流约束条件

$$\begin{cases} P_i = U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \theta_j + B_{ij} \sin \theta_j) \\ Q_i = U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \theta_j - B_{ij} \cos \theta_j) \end{cases}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

式中, P_i 和 Q_i 分别为节点 i 的有功与无功功率, U_i 和 U_j 分别为系统 n 个节点中第 i 和 j 个节点的电压, 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 i 和 j 间的相位差。

(2) 控制量约束条件

$$\begin{cases} P_{G,i} + \Delta P_{G,i} \leq P_{MPPT} \\ -Q_{LU} \leq G_{G,i} + \Delta Q_{G,i} \leq Q_{GU} \\ -P_L \leq P_{st,i} + \Delta P_{st,i} \leq P_U \\ -Q_L \leq Q_{st,i} + \Delta Q_{st,i} \leq Q_U \end{cases}, \quad (3)$$

式中, $P_{G,i}$ 和 $Q_{G,i}$ 为风机节点 i 的有功、无功出力, $P_{st,i}$ 和 $Q_{st,i}$ 为储能节点 i 的有功、无功出力, P_{MPPT} 为风机有功出力的上限, Q_{GU} 和 $-Q_{LU}$ 为风机无功出力的上、下限, P_U 和 $-P_L$ 为储能有功出力的上、下限, Q_U 和 $-Q_L$ 为储能无功出力的上、下限。

(3) 安全约束条件

$$\begin{cases} U_{i,min} \leq U_i \leq U_{i,max} \\ S_{i,min} \leq S_i \leq S_{i,max} \end{cases}, \quad (4)$$

式中, $U_{i,max}$ 和 $U_{i,min}$ 为节点 i 电压的上、下限约束, S_i 为节点 i 到节点 j 的视在功率, $S_{i,max}$ 和 $S_{i,min}$ 为节点 i 到节点 j 的视在功率的上、下限约束。

(4) 储能运行约束条件

$$\begin{cases} S_{OC} = S_{OC0} + \int_0^t P_d dt \\ S_{OC,min} \leq S_{OC} \leq S_{OC,max} \\ -P_{max} \leq P \leq P_{max} \\ -Q_{max} \leq Q \leq Q_{max} \\ Q_{max} = \sqrt{S^2 - P^2} \\ P = \eta P_d \end{cases}, \quad (5)$$

式中, S_{OC} 、 S_{OC0} 、 $S_{OC,min}$ 和 $S_{OC,max}$ 分别为储能荷电状态、储能荷电状态初值、储能荷电状态的下限和上限, P 、 P_{max} 分别为储能有功功率、最大储能有功功率, S 、 Q 和 Q_{max} 分别为储能复功率、无功功率和最大储能无功功率, P_d 为储能元件发出的有功功率, T_d 为额定功率下的放电时间, η 为储能系统的整体运行效率。

2.2 内点法求解稳态模型

内点法作为一种求解线性规划或非线性凸优化问题的算法,不论是在求解带约束的线性规划问题还是求解带约束的二次规划问题上都有极好的性能。本研究选择跟踪中心轨迹内点法作为优化潮流的方法,其优势是计算过程中,松弛变量与拉格朗日乘子只需满足约束条件即可,简化了原有模

型迭代过程,极大减少了计算量^[19]。

采用内点法求解稳态潮流优化模型,需将不等式约束转化为等式约束,设置优化问题中各变量的初值,进行迭代优化,迭代公式如下:

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} + \alpha_p \Delta x, \quad (6)$$

$$l^{(k+1)} = l^{(k)} + \alpha_p \Delta l, \quad (7)$$

$$u^{(k+1)} = u^{(k)} + \alpha_p \Delta u, \quad (8)$$

$$y^{(k+1)} = y^{(k)} + \alpha_d \Delta y, \quad (9)$$

$$z^{(k+1)} = z^{(k)} + \alpha_d \Delta z, \quad (10)$$

$$\omega^{(k+1)} = \omega^{(k)} + \alpha_d \Delta \omega, \quad (11)$$

式中, k 为迭代次数, $x^{(k)}$ 为第 k 次迭代的变量, $l^{(k)}$ 和 $u^{(k)}$ 为第 k 次迭代的松弛变量, $z^{(k)}$ 、 $\omega^{(k)}$ 、 $y^{(k)}$ 为第 k 次迭代的拉格朗日乘子, Δx 、 Δl 、 Δu 、 Δy 、 Δz 和 $\Delta \omega$ 为变量、松弛变量及拉格朗日乘子的增量, α_p 和 α_d 为步长。通过迭代求出变量的最优解,即为最优的稳态运行点。

3 暂态电压安全预防控制阶段的风机和储能协同控制

3.1 暂态电压安全评估标准

随着风电机组的大规模接入,电网的电压支撑能力下降,在遭受大的扰动故障后,会发生严重的暂态电压安全问题。为此,文献[20]规定了高/低电压的安全穿越标准:风电场节点电压标幺值跌落至0.20时,需持续运行0.625 s,且能够在2 s内高于低电压穿越边界并恢复至0.90;风电场节点电压标幺值在故障后0.5 s内不应超过1.30,在0.5~1.0 s内不应超过1.25,在1.0~10 s内不应超过1.20,如图3所示。

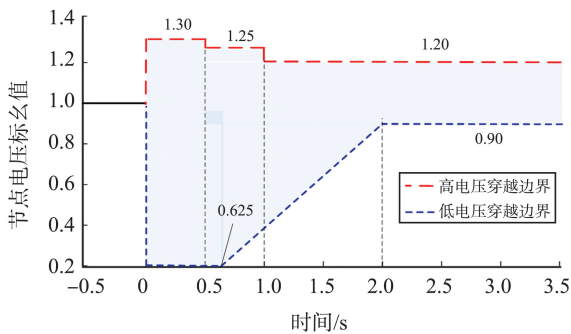


图3 风电场高/低电压安全穿越要求

Fig.3 High/low voltage safe crossing requirements for wind farm

3.2 暂态电压安全预防控制优化模型的构建

针对第二阶段的风电场暂态电压安全问题,以偏离稳态潮流优化阶段确定的潮流运行点程度最

小为目标,在满足风电场暂态电压安全约束、送端电网潮流和暂态时域解方程约束、控制量和安全约束及储能运行约束的前提下,构建暂态电压安全预防控制优化模型,目标函数

$$\min \frac{1}{2} [\|P-P^*\|_2^2 + \|Q-Q^*\|_2^2] + \rho, \quad (12)$$

式中, P 和 Q 分别为对稳态潮流运行点进行修正后储能和风机的有功、无功出力向量, P^* 和 Q^* 分别为稳态优化后储能和风机的有功、无功出力向量, ρ 为计及暂态电压安全的惩罚系数。

暂态电压安全预防控制优化模型的约束条件如下。

(1)高/低暂态电压安全约束条件

$$\rho = \begin{cases} 0, & \text{满足暂态电压安全约束} \\ M, & \text{不满足暂态电压安全约束} \end{cases}, \quad (13)$$

式中 M 为正大数。在送端电网的各风电场站及外送通道分别设置三相短路故障,进行时域仿真,观察风电场的电压变化。若在所有故障场景下风电场的电压均满足暂态电压安全约束, ρ 取0;若存在风电场电压不满足暂态电压安全约束的故障场景,则 ρ 取 M 。

(2)潮流稳态约束条件同式(2)。

(3)暂态时域解方程

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = f(x, y, u) \\ 0 = g(x, y, u) \end{cases}, \quad (14)$$

式中, x 为动态元件的状态变量, u 为动态元件的因变量, y 为系统的代数变量, t 为动态过程时刻。微分方程刻画了动态元件(如风电机组、储能)的动态响应过程,代数方程表征了暂态过程中网络节点功率平衡特性。

(4)控制量约束条件同式(3)。

(5)储能运行约束条件同式(5)。

3.3 灰狼优化算法求解暂态模型

灰狼优化算法是一种新型的优化搜索方法。科学家们通过观察灰狼围猎猎物的行为,包括搜索、包围及攻击,提出了灰狼优化算法^[21]。

当需要求解的暂态电压安全预防控制优化问题的变量(储能和风机的有功、无功出力)的空间维度为 d ,灰狼的数量为 N ,第 i 只灰狼的位置可以表示为 X_i 。将该种群中最优解个体记为 α ,次优解个体记为 β ,次次优解个体记为 δ ,其他解记为 ω 。迭代时的位置更新公式为:

$$X_i(T+1) = X_p(T) - A_i | C_i X_p(T) - X_i(T) |, \quad (15)$$

式中: $X_p(T)$ 为猎物在 T 代时的位置; $X_i(T)$ 为第 i 只灰狼在 T 代时的位置; A_i 和 C_i 为协同系数, $A_i = 2ar_1 - a$, $C_i = 2r_2$,其中 r_1 和 r_2 为 $[0, 1]$ 之间的随机变量, a 为收敛因子, $a = 2 - t/t_{max}$, t_{max} 为最大迭代次数。

根据灰狼 α 、 β 和 δ 的位置 X_α 、 X_β 和 X_δ 更新所有个体的位置:

$$\begin{cases} X_1(T) = X_\alpha - A_1 | C_1 X_\alpha - X(T) | \\ X_2(T) = X_\beta - A_2 | C_2 X_\beta - X(T) | \\ X_3(T) = X_\delta - A_3 | C_3 X_\delta - X(T) | \\ X(T+1) = [X_1(T) + X_2(T) + X_3(T)] / 3 \end{cases} \quad (16)$$

迭代完成后, X_α 即为修正后储能和风电的有功无功出力。

4 算例分析

标准 Nordic 系统包含等效外部、北部、中心和南部 4 个区域。本研究在原有北部区域和等效外部区域的基础上,将除平衡机 g_{20} 外的共 11 台同步发电机组替换为同等出力水平的双馈风电机组,并在 1 012、1 013、1 014、1 021、1 022 节点配置电化学储能,呈现出高比例风电场送端电网形态。储能系统整体运行效率设置为 0.85,荷电状态的初值 S_{oc0} 为 0.5,荷电状态上限和下限分别为 0.8 和 0.2。该送端系统共包含 22 条线路、24 台变压器、8 处负荷和 2 条外送通道,其整体结构如图 4 所示^[22]。

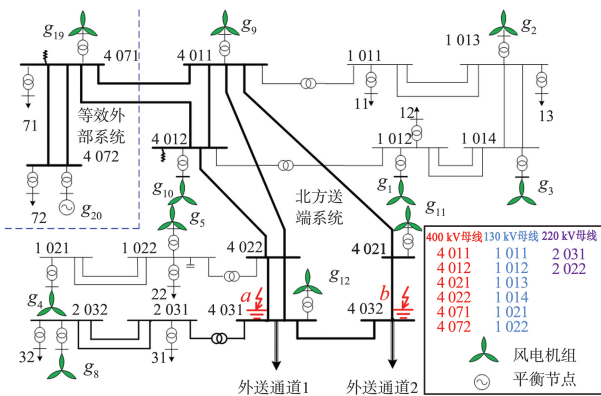


图4 高比例风电场送端系统

Fig.4 Sending-end power system with high proportion wind farms

4.1 稳态潮流优化

基于稳态优化目标函数,结合最优潮流内点法,分别在各风电机组原有出力为 80% (对应风电小发)、100% (对应风电中发)、120% (对应风电大发)的情况下计算最大化风电消纳。稳态优化下风

机无功出力、储能的有功和无功出力标么值如表 1、2 所示,基准值为 100 MW 或 100 Mvar。其中,负值表示功率流出系统的方向,正值表示功率注入系统的方向。

表 1 第一阶段潮流优化后风机无功出力标么值
Table 1 Reactive power output of wind turbines after the first stage of power flow optimization

节点	无功出力标么值		
	风电小发	风电中发	风电大发
g_1	-0.237	0.100	0.054
g_2	0.247	0.362	0.299
g_3	0.120	0.352	0.464
g_4	0.922	1.110	1.223
g_5	2.666	2.719	2.723
g_8	7.086	7.245	7.440
g_9	5.381	5.314	5.982
g_{10}	5.188	5.182	5.860
g_{11}	5.285	4.945	4.761
g_{12}	6.797	6.561	6.529
g_{19}	2.718	2.641	3.486
总和	36.173	36.531	38.821

表 2 第一阶段潮流优化后储能有功无功出力标么值
Table 2 Active and reactive output of energy storage after the first stage of power flow optimization

节点	风电小发		风电中发		风电大发	
	有功出力	无功出力	有功出力	无功出力	有功出力	无功出力
	标么值	标么值	标么值	标么值	标么值	标么值
1 012	-0.29	-0.66	-0.11	-0.29	-0.07	0.49
1 013	-0.41	-0.20	-0.25	-0.05	-0.31	0.21
1 014	-0.42	-0.19	-0.26	-0.09	-0.33	0.13
1 021	-0.31	-0.39	-0.51	-0.11	-0.88	0.37
1 022	0.87	2.31	0.73	1.87	0.76	1.86
总和	-0.56	0.87	-0.40	1.33	-0.83	3.06

由表 1、2 中数据可知,在第一阶段稳态优化配置下,储能设备整体处于充电状态,从而将多发出的清洁能源电力储存起来,极大化地保障风电消纳。

4.2 暂态电压安全预防控制优化

稳态优化保障了风电消纳最大化,提高了送端电网的运行经济性,但未计及受扰后的暂态电压安全问题。针对高比例风电场送端电网特征,对各风电场站和外送通道分别设置三相短路故障,确保送端电网的各风电场在所有故障场景下均能满足暂态电压安全约束。其中,经过稳态潮流优化后,外送通道节点 4 031、4 032 分别发生故障的各风电机组电压轨迹如图 5 所示。

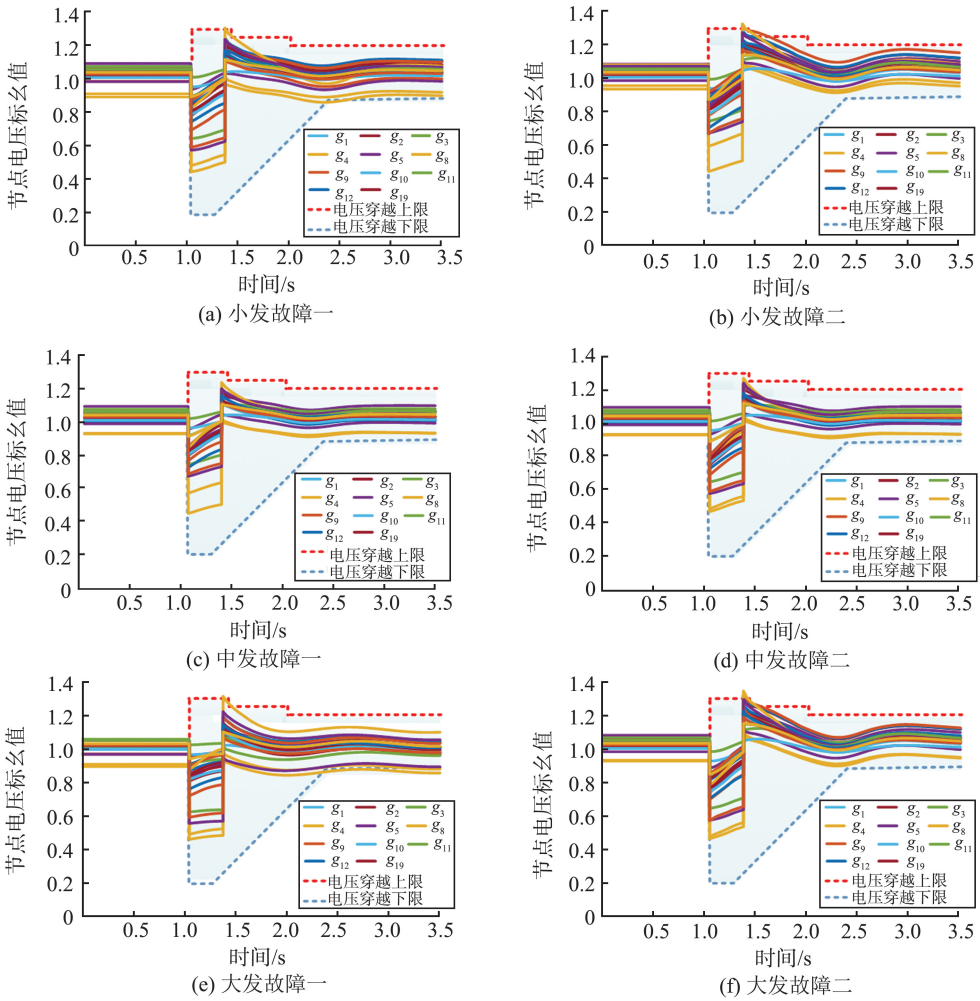


图5 第一阶段潮流优化后发生暂态故障时风电场电压

Fig.5 Wind farm voltage during transient faults after the first stage of power flow optimization

在风电小发和大发情况下,稳态优化后的储能和风电机组出力未能满足暂态电压安全要求,应在稳态优化确定潮流运行点基础上进一步针对暂态电压问题进行潮流运行点的修正。暂态电压安全预防控制优化后风机无功出力及储能的有功、无功出力标幺值如表3、4所示。

表3 第二阶段潮流修正后风机无功出力标幺值

Table 3 Reactive power output of wind turbines after the second stage power flow correction

节点	无功出力标幺值		
	风电小发	风电中发	风电大发
g_1	-0.234	0.100	0.031
g_2	0.324	0.362	0.294
g_3	0.118	0.352	0.467
g_4	0.916	1.110	1.201
g_5	3.025	2.719	2.733
g_8	7.206	7.245	7.512
g_9	5.418	5.314	6.044
g_{10}	5.212	5.182	5.866
g_{11}	5.265	4.945	4.767
g_{12}	6.832	6.561	6.487
g_{19}	2.779	2.641	3.499
总和	36.861	36.531	38.901

表4 第二阶段潮流修正后储能有功无功出力标幺值
Table 4 Active and reactive output of energy storage after the second stage power flow correction

节点	风电小发		风电中发		风电大发	
	有功出力标幺值	无功出力标幺值	有功出力标幺值	无功出力标幺值	有功出力标幺值	无功出力标幺值
1 012	0.04	-0.66	-0.11	-0.29	-0.02	0
1 013	-0.38	-0.20	-0.25	-0.05	-0.65	-0.67
1 014	0.16	-0.20	-0.26	-0.09	-0.19	0.13
1 021	2.83	-0.41	-0.51	-0.11	-0.77	-0.63
1 022	0.94	2.14	0.73	1.87	0.56	1.10
总和	3.59	0.67	-0.40	1.33	-1.07	-0.07

风电中发情况稳态优化配置已满足暂态电压安全要求,不再调整。表3、4与表1、2相比,储能功率配置变化明显,且在小发情况下由充电状态调整为放电状态,造成此现象的原因有2个方面:一方面是因保障暂态安全性在风电消纳上做出的牺牲;另一方面,若视风电机组远方的平衡节点电压为恒定,在小发情况下线路传输功率下降,线路网损减

少,导致机端电压和频率降低,为满足电压安全需要,储能从充电状态调整为放电状态。

经暂态电压安全预防控制优化后,外送通道节点4 031、4 032 发生故障后各风电机组电压轨

迹如图6所示。对比图5,经过暂态电压安全预防控制优化后,送端电网在风电场电压满足暂态电压安全标准的前提下实现了风电出力消纳最大化。

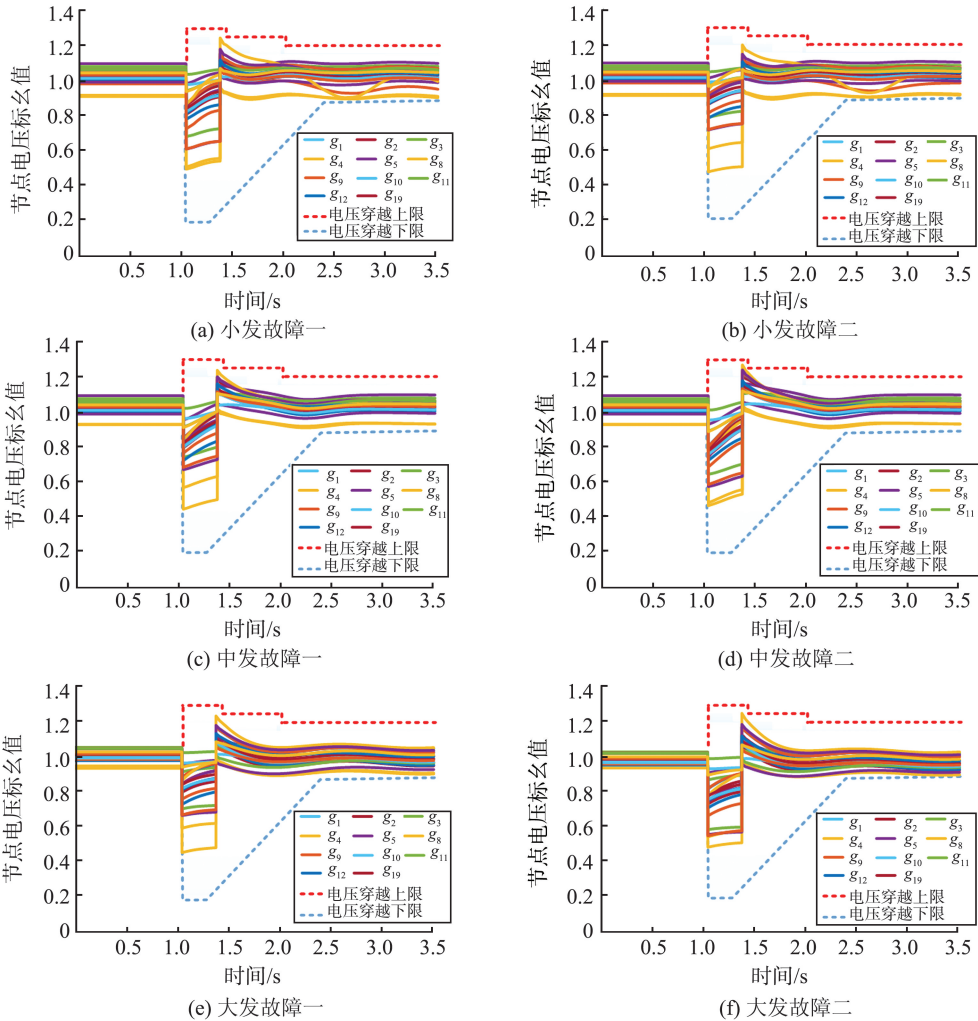


图6 第二阶段潮流修正后发生暂态故障时风电场电压

Fig.6 Wind farm voltage during transient faults after the second stage power flow correction

5 结论

本研究面向含高比例风电场的送端电网,提出基于送端电网风电消纳能力和电压支撑能力提升的风机和储能两阶段式的预防控制策略。第一阶段为稳态潮流优化,以储能和风机功率控制代价最小为目标,对含高比例风电场的送端电网进行最优潮流调控,减少储能与风机的功率变化;第二阶段为暂态电压安全预防控制优化,以偏离优化潮流运行点的程度最小为目标,修正优化后的潮流运行点,使受扰后送端电网的各风电场电压满足高/低暂态电压安全约束。在高比例风电场送端系统的仿真算例中,验证了所提风机和储能协调控制策略

能够有效控制电网中储能和风机的出力,使风电的消纳达到最大化,同时各风电场电压满足高/低电压安全穿越标准的要求,降低发生暂态电压安全问题的风险,对促进送端电网风电消纳、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] 李明节, 陈国平, 董存, 等. 新能源电力系统电力电量平衡问题研究[J]. 电网技术, 2019, 43(11): 3979-3986.
LI Mingjie, CHEN Guoping, DONG Cun, et al. Research on power balance of high proportion renewable energy system[J]. Power System Technology, 2019, 43(11): 3979-3986.
- [4] 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.
- [5] 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-arealine power in two-area interconnected power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(11): 167-175.
- [6] 赵鑫, 钱本华, 王睿, 等. 电化学储能参与电网安全稳定控制的研究综述[J]. 综合智慧能源, 2023, 45(1): 58-66.
ZHAO Xin, QIAN Benhua, WANG Rui, et al. Review of researches on grid security and stability control with the participation of electrochemical energy storage [J]. Integrated Intelligent Energy, 2023, 45(1): 58-66.
- [7] 蔡福霖, 胡泽春, 曹敏健, 等. 提升新能源消纳能力的集中式与分布式电池储能协同规划[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(20): 23-32.
CAI Fulin, HU Zechun, CAO Minjian, et al. Coordinated planning of centralized and distributed battery energy storage for improving renewable energy accommodation capability [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(20): 23-32.
- [8] 谢雨龙, 罗逸飏, 李智威, 等. 考虑微网新能源经济消纳的共享储能优化配置[J]. 高电压技术, 2022, 48(11): 4403-4413.
XIE Yulong, LUO Yiyang, LI Zhiwei, et al. Optimal allocation of shared energy storage considering the economic consumption of microgrid new energy[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(11): 4403-4413.
- [9] 于文山, 黎明, 由蕤. 含储能的三端 SOP 对主动配电网的潮流优化研究[J]. 太阳能学报, 2022, 43(3): 101-110.
YU Wenshan, LI Ming, YOU Rui, et al. Power flow optimization study on active distribution network based on three-terminal SOP with energy storage system [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2022, 43(3): 101-110.
- [10] 张振宇, 张小奇, 段乃欣, 等. 基于“等面积原理”的储能与新能源协同优化配置方法[J]. 电网技术, 2023, 47(10): 4131-4142.
ZHANG Zhenyu, ZHANG Xiaoqi, DUAN Naixin, et al. Synergistic and optimal configuration of energy storage and renewable energy based on equal area principle [J]. Power System Technology, 2023, 47(10): 4131-4142.
- [11] 郭霄宇, 于浩, 郑新, 等. 光伏系统液流电池储能优化配置[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(4): 1158-1167.
GUO Xiaoyu, YU Hao, ZHENG Xin, et al. Optimal configuration of liquid flow battery energy storage in photovoltaic system[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(4): 1158-1167.
- [12] CHEN Y, YE M, FU C, et al. Optimal allocation of dynamic var sources in power systems using two-stage strategy [C]//2020 IEEE 3rd Student Conference on Electrical Machines and Systems (SCEMS). Jinan, China; IEEE, 2020: 574-579.
- [13] 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.
- [14] 周莹坤, 孙华东, 徐式蕴, 等. 提升电网电压支撑强度的调相机优化配置方法[J]. 电网技术, 2022, 46(10): 3848-3856.
ZHOU Yingkun, SUN Huadong, XU Shiyun, et al. Synchronous condenser optimized configuration scheme for power grid voltage strength improvement [J]. Power System Technology, 2022, 46(10): 3848-3856.
- [15] 刘运鑫, 姚良忠, 廖思阳, 等. 分布式光储参与的直流受端近区配电网暂态电压控制方法[J]. 电网技术, 2023, 47(3): 1250-1261.
LIU Yunxin, YAO Liangzhong, LIAO Siyang, et al. Transient voltage control of distribution network in near-zone of DC receiving end with distributed photovoltaics and energy storage participated [J]. Power System Technology, 2023, 47(3): 1250-1261.
- [16] 王雪梅, 王艺博, 刘雨桐, 等. 基于虚拟电抗的主动支撑型新能源机组低电压穿越控制方法[J]. 电网技术, 2022, 46(11): 4435-4444.
WANG Xuemei, WANG Yibo, LIU Yutong, et al. Low voltage ride-through control of actively-supported new

- energy unit based on virtual reactance [J]. Power System Technology, 2022, 46(11): 4435-4444.
- [17] 李振坤, 鲍新雨, 邵宇鹰, 等. 考虑多种调压措施的分布式光伏消纳能力研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 10-16.
- LI Zhenkun, BAO Xinyu, SHAO Yuying, et al. Studying accommodation ability of distributed photovoltaic considering various voltage regulation measures [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 10-16.
- [18] 严干贵, 王茂春, 穆钢, 等. 双馈异步风力发电机组联网运行建模及其无功静态调节能力研究 [J]. 电工技术学报, 2008(7): 98-104.
- YAN Gangui, WANG Maochun, MU Gang, et al. Modeling of grid-connected doubly-fed induction generator for reactive power static regulation capacity study [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008(7): 98-104.
- [19] 李春晓, 何仁君. 基于内点法的最优潮流计算及算例分析 [J]. 电气开关, 2018, 56(1): 32-36.
- LI Chunxiao, HE Renjun. The calculation of optimal power flow based on interior-point method [J]. Electric Switchgear, 2018, 56(1): 32-36.
- [20] 中国电力企业联合会. 风电场接入电力系统技术规定: 第1部分陆上风电: GB/T 19963.1—2021 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [21] 李全耀, 沈艳霞. 一种基于教与学的混合灰狼优化算法 [J]. 控制与决策, 2022, 37(12): 3190-3196.
- LI Quanyao, SHEN Yanxia. A hybrid gray wolf optimization algorithm based on the teaching-learning optimization [J]. Control and Decision, 2022, 37(12): 3190-3196.
- [22] KENNEDY J, EBERHART R C. Particle swarm optimization [C]// Proceedings of IEEE International Conference on Neural Network. Perth, Australia: IEEE, 1995: 1942-1948.

(编辑:孙亚彤)

(上接第120页)

- [17] OLDHAM D, RAJIB A, DANDAMUDI K P R, et al. Transesterification of waste cooking oil to produce a sustainable rejuvenator for aged asphalt [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2021, 168: 105297.
- [18] LI H B, ZHANG F, FENG Z X, et al. Study on waste engine oil and waste cooking oil on performance improvement of aged asphalt and application in reclaimed asphalt mixture [J]. Construction and Building Materials, 2021, 276: 122138.
- [19] 汪海年, 徐宁, 陈玉, 等. 生物油再生老化沥青材料研究进展 [J]. 中国公路学报, 2023, 36(5): 1-20.
- WANG Hainian, XU Ning, CHEN Yu, et al. Advances in bio-oil regenerated aged asphalt materials [J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(5): 1-20.
- [20] XU N, WANG H, WANG H, et al. Research progress on resource utilization of waste cooking oil in asphalt materials: a state-of-the-art review [J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 385: 135427.
- [21] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程: JTG E20—2011 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [22] 中华人民共和国交通运输部. 公路沥青路面再生技术规范: JTG/T 5521—2011 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2019.
- [23] 王枫成. 增塑剂对苯乙烯-丁二烯-苯乙烯改性沥青低温性能的影响 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22(5): 2002-2008.
- WANG Fengcheng. Influence of plasticizer on low temperature performance of SBS modified asphalt [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(5): 2002-2008.
- [24] 董昭, 徐书东, 柳久伟, 等. 不同类型温拌剂对沥青性能影响 [J]. 山东大学学报(工学版), 2023, 53(1): 18-24.
- DONG Zhao, XU Shudong, LIU Jiuwei, et al. Effect of different types of warm mix agents on asphalt properties [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2023, 53(1): 18-24.

(编辑:郭少华)