

基于多阶轨迹灵敏度的交直流混联受端 电网无功储备优化方法

齐子杰¹, 陈天华^{2,3,4}, 王 彬⁵, 葛怀畅⁵, 陈建华^{2,3,4}, 徐陆飞^{2,3,4}

(1. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090; 2. 南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司, 江苏 南京 210006;
3. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 211106; 4. 智能电网保护和运行控制国家重点实验室, 江苏 南京 211106;
5. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100084)

摘 要: 电网在换相失败发生期间, 会消耗大量的动态无功功率, 一旦发生换相失败故障, 容易对电网安全运行产生影响。在此背景下, 研究如何通过优化交直流混联电网的无功储备, 来降低直流换流器换相失败事故扩散的风险。首先, 建立交直流混联系统的微分代数方程, 在一阶轨迹灵敏度基础上, 求取系统的多阶轨迹灵敏度; 然后, 针对电力系统当前的运行状况, 建立含发电机和容抗器的动态无功储备优化模型, 求解得到动态无功储备优化的最优解; 最后, 以某实际系统为模型进行仿真验证, 证明该方法的可行性与有效性。

关 键 词: 交直流混联电网; 换相失败; 微分代数方程; 轨迹灵敏度; 动态无功储备

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2022.01.009 中图分类号: TM734 文章编号: 1673-9140(2022)01-0074-08

Reactive power reserve optimization method for AC/DC hybrid receiving network based on multi-order trajectory sensitivity

QI Zijie¹, CHEN Tianhua^{2,3,4}, WANG Bin⁵, GE Huaichang⁵, CHEN Jianhua^{2,3,4}, XU Lufei^{2,3,4}

(1. College of Electric Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 210006, China; 3. NARI Technology Co. Ltd., Nanjing 211106, China;
4. State Key Laboratory of Smart Grid Protection and Control, Nanjing 211106, China; 5. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: During the process of the commutation failure in power grid, a large amount of dynamic reactive power are consumed. Once a commutation failure occurs, it affects the safe operation of the grid easily. Under the background, an reserve reactive power optimization for AC-DC hybrid power grids is proposed to reduce the risk of accidental DC commutation failure propagation. Firstly, a differential algebraic equation for the AC / DC hybrid system is established. The multi-order trajectory sensitivity of the system is obtained on the basis of the first-order trajectory sensitivity. According to the current operating conditions of the power system, a dynamic reactive power reserve optimization model

收稿日期: 2019-08-10; 修回日期: 2019-09-02

基金项目: 智能电网保护和运行控制国家重点实验室课题(面向含调相机的大规模交直流电力系统动态电压安全评估及预防控制关键技术)

通信作者: 王 彬(1984-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事电力系统调度自动化研究; E-mail: wb1984@tsinghua.edu.cn

including a generator and a reactor is then established, and the optimal solution of the dynamic reactive power reserve optimization is solved. Finally, a practical system is modeled to verify the feasibility and effectiveness of the method.

Key words: AC-DC hybrid power grid; commutation failure; algebraic differential equation; trajectory sensitivity; dynamic reactive reserve

中国中东部地区已建成大规模多直流落点的受端电网,“强直弱交”的特性十分明显^[1-2]。对于这些大型受端电网,与电压相关的暂态稳定问题(短期或中长期大扰动电压稳定)是目前电网运行中所面临的主要威胁之一^[3]。当电网受到扰动时,例如直流换流站近区网络发生严重故障,直流换流站可能会发生单次或连续换相失败^[4-7],换流器发生换相失败时需要吸收大量的动态无功,而换流站内部自身的无功补偿不足,因此需要与交流电网进行大量的无功功率交换。

系统动态无功储备(dynamic reactive power reserve, DRPR)的多少与电力系统的电压问题有着密切联系^[8-9]。为了保证电力系统发生故障后能快速的恢复至运行稳态,系统中应配置数量充足、配置合理的动态无功设备^[10]。因此,针对交直流混联的受端系统,如何在保证系统安全且可靠的运行前提下,同时考虑系统运行的安全性和经济性完成受端电网的动态无功储备评估,成为当前亟需解决的问题。

轨迹灵敏度分析(trajecory sensitivity analysis, TSA)方法是分析微分动态系统特性的有效工具之一^[11-12]。文献[13]把轨迹灵敏度分析引入电力系统的暂态稳定分析,得到衡量扰动对系统动态特性的影响程度;文献[14]结合轨迹灵敏度法推导出了轨迹灵敏度的高阶 Taylor 级数递推求解形式,快速有效地计算能量裕度灵敏度。由此可见,轨迹灵敏度实际上研究了动态系统的响应随系统参量变化的定量关系,对于电力系统,可研究的系统参量包括系统的初始运行状态、拓扑参数以及故障切除时间等一系列参量。

针对上述问题,近年来有了一系列动态无功储备的研究。文献[15]制定了发电机参与的最优无功功率储备分配,与传统的无功功率储备调度相比,有

更好的鲁棒性;文献[16]提出了一种基于混合整数动态优化的大型风电综合动态系统最优动态无功分配方法,考虑了详细的系统动态和风力发电机组合理性,同时优化了动态无功功率的分配,为动态无功模型的建立提供了新思路;文献[17]利用基于 Galerkin 法的多项式逼近,提出换相失败预防能力的评估指标和动态无功储备评估模型,但是只评估了单个换流站内的动态无功储备情况,且换流站外部的交流网络用等效发电机替代,未考虑直流控制系统的影响;文献[18-20]以动态无功设备的无功出力对系统运行需求的灵敏度进行评估,但是没有考虑系统的输电能力,因为在发生阻塞的情况下,在定义系统无功备用容量时需要考虑电网的可输电能力。

本文围绕交直流混联系统受端电网,展开基于轨迹灵敏度的动态无功储备的研究,首先建立交直流混联系统的微分代数方程,并求取多阶轨迹灵敏度;然后针对当前状况,建立动态无功储备优化模型并求解,求解完成后,各动态无功控制设备根据优化结果,进行稳态无功值的调整;最后通过具体算例验证了该方法的合理性。

1 交直流混联系统的轨迹灵敏度模型

对于交直流混联的受端电网,高压直流输电线路受端需要经过换流站后与降压变压器相连,进而与用户负荷相连。换流站的换相过程需要受端交流电网提供换相电压和电流,受端交流系统必须有足够的容量。因此,在换流站内需要具有多种无功调节与控制手段,通常包括动态无功设备(例如换流站的配套调相机)、滤波器组和电容补偿器等。故交直流混联受端电网重点考虑上述动态无功设备出力对于电压的轨迹灵敏度。

首先建立受端电网的代数微分方程,即

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, y, u) \\ 0 = g(x, y, u) \end{cases} \quad (1)$$

式中 x 为系统的状态变量,包括发电机内电势、功角、励磁电压、直流电流变量; y 为代数变量,包括系统的母线电压幅值和母线电压的相角; u 为控制变量,包括发电机无功出力和容抗器的无功出力。式(1)中的2个方程分别描述了系统的动态过程和系统变量之间的代数关系。

故障发生后清除前和故障清除后时段为

$$0 = g^s(x, y, u) \quad (2)$$

式中 s 为故障编号。

$$0 = g^{s,c}(x, y, u) \quad (3)$$

式中 c 为故障清除。

$$x_u^{t_0^+} = x_u^{t_0^-} \quad (4)$$

式中 t_0 故障发生时刻; t_0^- 、 t_0^+ 为故障发生前和故障发生后的初始时刻; $x_u^{t_0^-}$ 、 $x_u^{t_0^+}$ 分别为故障发生前和故障发生后的初始状态下,状态变量初值对控制变量的偏导数。

$$y_u^{t_0^+} = -(g_y^{s,t_0^+})^{-1} g_u^{s,t_0^+} \quad (5)$$

式中 $y_u^{t_0^+}$ 为故障发生后的初始状态时,代数变量对控制变量的偏导数; g_y^{s,t_0^+} 、 g_u^{s,t_0^+} 分别为发生第 s 个故障后的初始状态下,对代数变量和控制变量的偏导数。

$$x_u^{t_c^+} = x_u^{t_c^-} \quad (6)$$

式中 $x_u^{t_c^-}$ 、 $x_u^{t_c^+}$ 分别为故障发生前的初始状态和故障清除后的初始状态下状态变量和代数变量对控制变量的偏导数。

$$y_u^{t_c^+} = -(g_y^{s,c,t_c^+})^{-1} g_u^{s,c,t_c^+} \quad (7)$$

式中 g_y^{s,c,t_c^+} 、 g_u^{s,c,t_c^+} 分别为发生清除第 s 个故障后的初始状态下,对代数变量和控制变量的偏导数。

在故障发生时段内任意时刻 $t \in [t_0^+, t_c^-]$,令 $T = t$,可计算出 T 时刻的值 x_u^T 、 y_u^T ,其为 T 时刻的灵敏度; $T + 1$ 时刻的值 x_u^{T+1} 、 y_u^{T+1} ,其为 $T + 1$ 时刻的灵敏度。

$$\begin{bmatrix} \left(\mathbf{I} + \frac{h}{2} f_x^T \right) x_u^T + \frac{h}{2} f_x^T y_u^T + \\ \left[x_u^{T+1} \right] \\ \left[y_u^{T+1} \right] \end{bmatrix} = \mathbf{J}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{h}{2} (f_u^{T+1} + f_u^T) \\ \frac{h}{2} g_x^T x_u^T + \frac{h}{2} g_y^T y_u^T + \frac{h}{2} (g_u^{T+1} + g_u^T) \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中 h 为仿真步长; \mathbf{I} 为单位矩阵; \mathbf{J} 为系统的雅克比矩阵; x_u^T 、 y_u^T 分别为 T 时刻,系统状态变量和代数变量对控制变量的偏导数; x_u^{T+1} 、 y_u^{T+1} 分别为 $T + 1$ 时刻,系统状态变量和代数变量对控制变量的偏导数; f_x^T 、 f_y^T 分别为 T 时刻,微分方程对状态变量和代数变量的偏导数; g_x^T 、 g_y^T 分别为 T 时刻,代数方程对状态变量和代数变量的偏导数; f_u^T 、 f_u^{T+1} 分别为 T 和 $T + 1$ 时刻微分方程对控制变量的偏导数; g_u^T 、 g_u^{T+1} 分别为 T 和 $T + 1$ 时刻代数方程对控制变量的偏导数。

2 二阶轨迹灵敏度模型

对于精度要求比较高的系统,一阶轨迹灵敏度无法满足系统的要求,需要在一阶轨迹灵敏度的基础上进一步求取更高阶的轨迹灵敏度,以满足系统的需求。

对于二阶轨迹灵敏度的求解,首先在故障发生的 $t \in [t_0^+, t_c^-]$ 时间内,根据式(1),两边同时对 u 求偏导,得一阶轨迹灵敏度方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_u = f_x x_u + f_y y_u + f_u \\ 0 = g_x x_u + g_y y_u + g_u \end{cases} \quad (9)$$

对式(9)两边分别对控制变量 u 求偏导,可得到连续时段内的二阶轨迹灵敏度。

$$\begin{cases} \dot{x}_{uu} = f_x x_{uu} + f_y y_{uu} + f_{uu} + f_{xx} x_u^2 + \\ f_{yy} y_u^2 + 2f_{xy} x_u y_u + 2f_{xu} x_u + 2f_{yu} y_u \\ 0 = g_x x_{uu} + g_y y_{uu} + g_{uu} + g_{xx} x_u^2 + \\ g_{yy} y_u^2 + 2g_{xy} x_u y_u + 2g_{xu} x_u + 2g_{yu} y_u \end{cases} \quad (10)$$

对于故障前时段 $t \in [0, t_0^-]$ 、故障发生时段 $t \in [t_0^+, t_c^-]$ 和故障清除后的时段 $t \geq t_c^+$ 这3个不同时段,在故障发生时段内,可根据 $T = t$ 时刻的值

x_{uu}^T 、 y_{uu}^T , 计算出 $T=t+1$ 时刻的值 x_{uu}^{T+1} 、 y_{uu}^{T+1} 。

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{uu}^{T+1} \\ \mathbf{y}_{uu}^{T+1} \end{bmatrix} = \\ \mathbf{J}^{-1} \begin{bmatrix} \left(\mathbf{I} + \frac{h}{2} f_x^T \right) \mathbf{x}_{uu}^T + \frac{h}{2} f_y^T \mathbf{y}_{uu}^T + \\ \frac{h}{2} (F^{T+1} + F^T) \\ \frac{h}{2} g_x^T \mathbf{x}_{uu}^T + \frac{h}{2} g_y^T \mathbf{y}_{uu}^T + \frac{h}{2} (G^{T+1} + G^T) \end{bmatrix} \\ F = \\ f_{uu} + f_{xx} x_u^2 + f_{yy} y_u^2 + 2f_{xy} x_u y_u + \\ 2f_{xu} x_u + 2f_{yu} y_u \\ G = \\ g_{uu} + g_{xx} x_u^2 + g_{yy} y_u^2 + 2g_{xy} x_u y_u + \\ 2g_{xu} x_u + 2g_{yu} y_u \end{cases} \quad (11)$$

式中 x_{uu}^T 、 y_{uu}^T 分别为 T 时刻, 系统状态变量和代数变量对控制变量的偏导数; x_{uu}^{T+1} 、 y_{uu}^{T+1} 分别为 $T+1$ 时刻, 系统状态变量和代数变量对控制变量的偏导数; f_x^T 、 f_y^T 分别为 T 时刻, 微分方程对状态变量和代数变量的偏导数; F^T 、 F^{T+1} 分别为 T 和 $T+1$ 时刻微分方程对控制变量的偏导数; G^T 、 G^{T+1} 分别为 T 和 $T+1$ 时刻代数方程对控制变量的偏导数。

对于二阶轨迹灵敏度最优解的求解, 可用原一对偶内点法^[20]求解, 将非线性优化问题可转换为

$$\begin{cases} \min f(x_C, x_D) \\ \text{s. t. } g(x_C, x_D, x_0) = 0 \\ x_C^{\text{down}} \leq x_C \leq x_C^{\text{up}} \\ x_D^{\text{down}} \leq x_D \leq x_D^{\text{up}} \end{cases} \quad (12)$$

式中 x_C 、 x_D 、 x_0 分别为需优化的连续变量、离散变量和其它变量; x_C^{up} 、 x_C^{down} 分别为需优化的连续变量的上下限; x_D^{up} 、 x_D^{down} 分别为需优化的离散变量的上下限。

分别引入大于等于 0 的松弛变量、二次罚函数, 即

$$\begin{cases} x_C + u_{C1} = x_C^{\text{up}}, x_C - u_{C2} = x_C \\ x_D + u_{D1} = x_D^{\text{up}}, x_D - u_{D2} = x_D \end{cases} \quad (13)$$

$$P(x_{D,i}) = \omega_i (x_{D,i} - x_{D,i}^*)^2 \quad (14)$$

式(14)中 ω_i 为罚因子(设定为 10); $x_{D,i}^*$ 为根据离散变量通过“连续化”求解后, 得到的最接近的离散值, 在优化过程中是动态变化的。

进而得到增广拉格朗日函数为

$$\begin{aligned} L = & f(x_C, x_D) - \lambda^T g(x_C, x_D, x_0) - \\ & \lambda_{C1}^T (x_C + u_{C1} - x_C^{\text{up}}) - \lambda_{C2}^T (x_C - u_{C2} - x_C^{\text{down}}) - \\ & \lambda_{D1}^T (x_D + u_{D1} - x_D^{\text{up}}) - \lambda_{D2}^T (x_D - u_{D2} - x_D^{\text{down}}) + \\ & \mu \sum \ln(u_{C1,i} + u_{C2,i} + u_{D1,i} + u_{D2,i}) + \sum P(x_{D,i}) \end{aligned} \quad (15)$$

设定补偿间隙为

$$\begin{aligned} g_{\text{ap}} = & \sum (\lambda_{C1,i} u_{C1,i} - \lambda_{C2,i} u_{C2,i}) + \\ & \sum (\lambda_{D1,i} u_{D1,i} - \lambda_{D2,i} u_{D2,i}) \end{aligned} \quad (16)$$

当补偿间隙偏差小于给定阈值时, 输出最优解。

3 动态无功储备优化模型

电力系统动态无功储备的多少和电力系统的电压安全有着密切联系, 系统在稳态运行时, 当系统的发电机、SVC、SVG、STATCOM 等无功补偿设备有充足的无功预留时, 系统运行更加安全可靠, 但是无功预留过剩实际上是对无功资源的浪费。因此在系统正常运行时, 需要预留出多少的无功才能保证系统在发生故障时仍然可以维持“正常且安全”的运行方式, 可以借助二阶轨迹灵敏度来实现。

首先建立动态无功储备优化模型的目标函数为

$$\min \sum_{i=1}^{N_{\text{station}}} (N_{c,i} - N_{c,i}^{\text{current}}) \quad (17)$$

式中 N_{station} 为场站容抗器总数; $N_{c,i}^{\text{current}}$ 、 $N_{c,i}$ 分别为场站第 i 个容抗器当前的投入组数和优化后的投入组数。

优化问题的约束条件包括场站容抗器投入的组数约束、场站发电机稳态时的无功出力约束、换相失败故障后的 $N-1$ 安全约束条件, 即

$$N_{c,i}^{\text{down}} \leq N_{c,i} \leq N_{c,i}^{\text{up}} \quad (18)$$

$$Q_g^{0,\text{down}} \leq Q_g^0 \leq \overline{Q_g^{0,\text{up}}} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} V_{\text{CS}}^{\text{INV},s,T_{\text{end}}} = & V_{\text{CS}}^{\text{INV},s,T_{\text{end}},\text{current}} + S_{Q_g}^{s,T_{\text{end}}} (Q_g^0 - Q_g^{0,\text{current}}) + \\ & S_{Q_c}^{s,T_{\text{end}}} (Q_c^0 - Q_c^{0,\text{current}}) \geq V_{\text{CS,criterion}}^{\text{INV}} \end{aligned} \quad (20)$$

4.2 算例 2

以某省电网为例,省内有 5 个 1 000 kV 变电站,61 个 500 kV 变电站,3 个 LCC-HVDC 直流落点,由于此电网结构复杂,1 000 kV 之间的关键联络线及直流落点近区附近,发生故障时很容易引起电压安全问题。

以某 LCC-HVDC 直流落点近区为例分析,该直流换流站内有 2 条与其他 500 kV 变电站相连的高压交流线路(均为双回线),以下简称线路 1、2。线路 1、2 的相连线路有容抗器,每条线路有 10 个与其相关得容抗器,用 A~J 表示,作为无功储备设备,容抗器的容量如表 2 所示。

系统初始状态容抗器全部投入运行,利用上述优化模型计算分析,计算可得最优解 $Q^{0, reserve} = 8.698 2$,无功储备最优解对应的容抗器投切状态如表 4、5 所示(O 为容抗器投入,X 为容抗器切除)。

表 2 线路 1 相关容抗器容量

Table 2 Line 1 related capacitor capacity

名称	容量/p. u.
1A	2.750 002 75
1B	0.670 530 71
1C	0.111 755 10
1D	0.214 569 80
1E	0.111 755 10
1F	0.092 359 58
1G	0.268 212 21
1H	0.092 359 58
1I	0.149 999 99
1J	0.111 847 46

表 3 线路 2 相关容抗器容量

Table 3 Line 2 related capacitor capacity

名称	容量/p. u.
2A	2.750 002 75
2B	0.223 510 18
2C	0.923 595 89
2D	0.219 499 98
2E	0.092 359 58
2F	0.111 755 10
2G	0.111 755 10
2H	0.111 755 10
2I	0.184 719 17
2J	0.080 000 00

表 4 线路 1 相关容抗器投切状态

Table 4 Switching status of line 1 related capacitors

名称	投切状态	名称	投切状态
1A	O	1F	X
1B	O	1G	O
1C	O	1H	X
1D	O	1I	O
1E	O	1J	O

表 5 线路 2 相关容抗器投切状态

Table 5 Switching status of line 2 related capacitors

名称	投切状态	名称	投切状态
2A	O	2F	O
2B	O	2G	O
2C	X	2H	O
2D	O	2I	O
2E	X	2J	X

对于线路 1、2 进行故障设置,在 0.1 s 时发生三线短路接地故障,0.2 s 立即切除双回线中的一条线路,对线路 1、2 的电压恢复状况分别进行仿真分析,以换流站低压侧 500 kV 交流母线电压作为参考基准,无功优化前后的电压恢复情况对比如图 4、5 所示。

由图 4、5 可知,对于线路 1、2 来说,在线路故障切除后,换流站母线电压可以快速恢复到稳态时的正常电压水平,不会引发电压安全问题。在进行无功优化后,对于线路 1,优化前需要 0.59 s,母线电压可达到 0.859 p. u.,而优化后仅需要 0.44 s,母线电压即可达到 0.859 p. u.;对于线路 2,优化前需要 0.83 s 母线电压可达到 0.856 p. u.,而优化后仅需要 0.57 s,母线电压即可达到 0.856 p. u.。

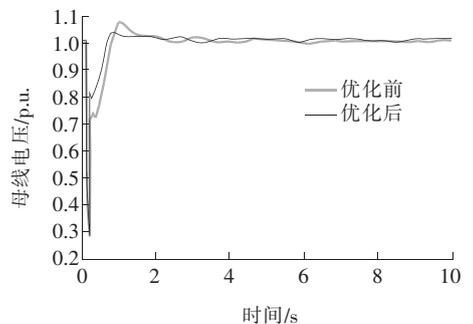


图 4 线路 1 无功优化前后母线电压恢复

Figure 4 Bus voltage recovery diagram before and after line 1 reactive power optimization

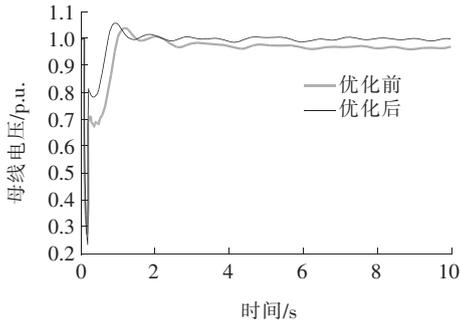


图5 线路2无功优化前后母线电压恢复

Figure 5 Bus voltage recovery diagram before and after line 2 reactive power optimization

由上述算例分析可知,本文所提的无功优化效果较好,可以使故障后的电压水平迅速恢复到稳态运行时的安全水平,从而保证了电力系统的安全运行。

5 结语

1)本文提出了一种新的用来优化受端电网动态无功储备的方法。利用求取的电力系统轨迹灵敏度,来确定电力系统的无功补偿设备要预留出多少的动态无功,确保电力系统可以在“正常且安全”的情况下运行。

2)对于轨迹灵敏度的求取,建立了受端电网的微分代数方程,基于电力系统的微分代数方程,用轨迹灵敏度分析法得到控制变量与状态变量之间的灵敏度关系。

3)本文可以解决对于精度要求不高的系统动态无功储备的问题,提高了系统运行的安全性与经济性。但是对于精度要求高的系统,系统的高阶轨迹灵敏度的求取还需要进一步探讨。

参考文献:

[1] 徐蔚,林勇,周煜智,等. 区域电网互联对广东电网暂态稳定性的影响分析[J]. 电力系统自动化,2013,37(21): 34-38.
XU Wei, LIN Yong, ZHOU Yuzhi, et al. Impact analysis of regional grid interconnection on transient stability of Guangdong power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(21): 34-38.

[2] 徐政. 交直流电力系统动态行为分析[M]. 北京:机械工业出版社,2004.

[3] 颜伟,杨彪,莫静山,等. 交直流系统主导节点选择与无功分区的概率优化方法[J]. 中国电力,2020,53(8): 77-84.
YAN Wei, YANG Biao, MO Jingshan, et al. Probabilistic optimization method of leading node selection and reactive power zoning in AC /DC system [J]. Electric Power, 2020, 53(8): 77-84.

[4] 王邦彦,王秀丽,宁联辉. 海上风电场集电系统开关配置最优化及可靠性评估[J]. 供用电,2021,38(4):43-51.
WANG Bangyan, WANG Xiuli, NING Lianhui. Switch configuration optimization and reliability evaluation of offshore wind farm collector system[J]. Distribution & Utilization, 2021, 38(4): 43-51.

[5] SHAO Y, TANG Y. Fast evaluation of commutation failure risk in multi-infeed HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(1): 646-653.

[6] 张伟晨,熊永新,李程昊,等. 基于改进 VDCOL 的多馈入直流系统连续换相失败抑制及协调恢复[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(13):63-72.
ZHANG Weichen, XIONG Yongxin, LI Chenghao, et al. Continuous commutation failure suppression and coordinated recovery of multi-infeed DC system based on improved VDCOL[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(13): 63-72.

[7] 冯长有,姚伟锋,江叶峰,等. 特高压直流运行风险评估技术研究及应用[J]. 智慧电力,2020,48(7):30-37.
FENG Changyou, YAO Weifeng, JIANG Yefeng, et al. Study and application of UHVDC operation risk evaluation[J]. Smart Power, 2020, 48(7): 30-37.

[8] 边宏宇,徐友平,党杰,等. 直流受端多资源电压协调控制策略研究[J]. 电网与清洁能源,2020,36(4):48-54.
BIAN Hongyu, XU Youping, DANG Jie, et al. Research on multi-Resource voltage coordinated control strategy at DC receiving terminal[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(4): 48-54.

[9] NIU T, GUO Q L, SUN H B, et al. Dynamic reactive power reserve optimisation in wind power integration areas[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2018, 12(2): 507-517.

[10] 孙宏斌,郭庆来,张伯明. 电力系统自动电压控制(第一版)[M]. 北京:科学出版社,2018.

[11] 潮铸,刘明波. 基于2阶轨迹灵敏度的暂态稳定约束最优潮流计[J]. 电网技术,2011,35(7):106-112.
CHAO Zhu, LIU Mingbo. Transient stability con-

- strained optimal power flow calculation based on second-order trajectory sensitivity [J]. *Power System Technology*, 2011, 35(7): 106-112.
- [12] 续昕,张恒旭,李常刚,等. 基于轨迹灵敏度的紧急切负荷优化算法[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(18): 143-148.
XU Xin, ZHANG Hengxu, LI Changgang, et al. Emergency load shedding optimization algorithm based on trajectory sensitivity[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(18): 143-148.
- [13] 李淼,雷鸣,周挺,等. 基于深度森林的电力系统暂态稳定评估方法[J]. *电测与仪表*, 2021, 58(2): 53-58.
LI Miao, LEI Ming, ZHOU Ting, et al. Transient stability assessment method for power system based on deep forest[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2021, 58(2): 453-58.
- [14] 夏世威,白雪峰,陈士麟,等. 基于 Taylor 级数轨迹灵敏度的动态安全域求解[J]. *电力自动化设备*, 2018, 38(6): 157-164.
XIA Shiwei, BAI Xuefeng, CHEN Shilin, et al. Solving for dynamic security region based on Taylor series trajectory sensitivity[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2018, 38(6): 157-164.
- [15] YAO L, ZHU Z, MA Z, et al. Interval optimal reactive power reserve dispatch considering generator rescheduling[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2016, 10(8): 1833-1841.
- [16] RATHER Z H, CHEN Z, THOGERSEN P, et al. Dynamic reactive power compensation of large-scale wind integrated power system[J]. *Power Systems IEEE Transactions on*, 2015, 30(5): 2516-2526.
- [17] 何柏娜,颀雅迪,王乐森,等. 超特高压交直流线路同塔架设潜供电流特性分析[J]. *高压电器*, 2020, 56(10): 168-175.
HE Baina, XIE Yadi, WANG Lemiao, et al. Analysis on secondary arc current characteristics of EHV/UHV AC/DC transmission lines erecting on the same tower [J]. *High Voltage Apparatus*, 2020, 56(10): 168-175.
- [18] CHOI Y H, SEO S, KANG S, et al. Justification of effective reactive power reserves with respect to a particular bus using linear sensitivity[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2011, 26(4): 2118-2124.
- [19] 熊虎岗,程浩忠,徐敬友. 考虑提高系统无功备用容量的无功优化调度[J]. *电网技术*, 2006, 30(23): 36-40.
XIONG Hugang, CHENG Haozhong, XU Jingyou. Optimal dispatch of reactive power considering increase of system reactive power reserve[J]. *Power System Technology*, 2006, 30(23): 36-40.
- [20] LIU M B, TSO S K, CHENG Y. An extended nonlinear primal-dual interior-point algorithm for reactive-power optimization of large-scale power systems with discrete control variables[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2002, 17(4): 982-991.