

DOI:10.12158/j.2096-3203.2021.03.012

计及电压弹性力的多动态无功装置优化运行

赵欣¹, 施祎辰¹, 张宁宇²

(1. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096;

2. 江苏省电力试验研究所有限公司, 江苏 南京 211103)

摘要:为提升受端电网电压支撑能力和减少直流连续换相失败风险,文中提出一种多动态无功装置运行优化方法。首先,考虑故障后电网电压恢复速度和直流熄弧角变化关键特征,提出适用于受端电网的电压弹性评估指标,精确衡量受端电网故障后的电压恢复能力;然后,以电压弹性最大为优化目标,多动态无功补偿装置无功出力为优化变量,考虑受端电网潮流平衡、节点电压上下限等稳态约束和暂态约束条件,建立多维非线性含微分方程的数学优化模型;最后,采用粒子群算法对上述模型进行优化求解,以实际苏州南部电网为例进行仿真验证,结果表明文中方法可有效提升短路故障后电网电压恢复速度,并减少直流连续换相失败次数。

关键词:动态无功装置;交直流混联电网;换相失败;电压弹性力;协调运行

中图分类号:TM761

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2021)03-0078-06

0 引言

为提升受端电网短路故障后电压恢复速度,减少直流连续换相失败次数,避免双极闭锁故障的发生,越来越多的动态无功装置被接入直流落点近区电网,如锦苏特高压直流近区电网接入了调相机、静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)等动态无功装置等^[1-5]。电网运行调度人员通常采用动态无功装置参与电网稳态电压调节,但当无功出力设置不合理时,例如动态无功装置容量较多用于稳态电压调节,那么故障后的无功输出容量易受到限制,影响其暂态电压支撑能力,从而降低电压恢复速度,增加直流换相失败风险。因此,如何优化多动态无功装置的运行策略,同时提升受端电网稳态和暂态电压稳定性,是电网调度运行人员亟需解决的难题。

近年来,国内外取得了许多关于动态无功补偿装置优化运行的研究成果。文献[6-7]为减少多回直流同时换相失败的风险,提出了适用于实际电网的动态无功装置配置方法。文献[8]提出一种两阶段动态无功补偿装置调度运行方法,实现多个动态无功装置之间的协调优化运行。为减少受端电网直流换相失败风险,文献[9]提出一种特高压直流与STATCOM协调控制方法,通过换相失败免疫指数和换相失败概率指数对其有效性进行验证。文献[10-11]构建了适用于调相机、电容/电抗器、发电机等无功资源的多目标无功电压协调控制系

统,并将无功电压控制纳入电网稳定控制范畴,充分发挥了电网无功电源的电压支撑作用。文献[12-14]针对电网“强直弱交”特性,提出调相机和直流无功协调控制方法,改善了电压稳定性。文献[15-16]在最优潮流模型中考虑了STATCOM,通过优化运行参数提升了电网静态电压稳定裕度。文献[17-18]则在机组组合模型中考虑多种柔性交流输电系统(flexible AC transmission systems, FACTS)装置,消除了线路过载和电压越限,并减少了电网运行成本。文献[19-20]研究了统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)与常规机组的协调优化运行方法,消除风电随机性引起的潮流分布不均和电压越限。

综上所述,虽然在动态无功补偿装置配置和协调控制方面已有不少成果,但从电网调度运行人员角度,如何优化多动态无功补偿装置运行策略,同时提升电网稳态和暂态电压稳定性却鲜有研究。

文中从电网调度运行角度出发,开展多动态无功补偿装置优化运行研究。首先,提出交直流受端电网的电压弹性评估指标;然后,以电压弹性最大为优化目标,多动态无功装置稳态无功出力为优化变量,考虑电网稳态和暂态运行约束情况下,建立优化模型;最后,采用粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)求解,并以实际电网进行仿真验证。

1 受端电网电压弹性力定义

特高压直流输电技术在远距离、大容量输电等方面有着天然优势,有效支撑了我国“西电东送”战略的实施。近年来特高压直流工程在我国的陆续

收稿日期:2020-11-23;修回日期:2021-01-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51707090)

投运,区外来电已成为受端电网的主要电源,负荷中心电网电源“空心化”特征日趋凸显,导致电网电压支撑能力弱化。对于交直流受端电力系统而言,短路故障后电网电压如不能快速恢复,将直接影响直流运行,引发连续换相失败甚至双极闭锁等故障,严重威胁受端电网的安全稳定性运行。因此,对受端电网遭受故障后电压恢复能力进行精准、定量的评估,对于掌握电网运行特性,提升电压稳定性有着重要的意义。

弹性概念已被应用于环境学、经济学和生物学等学科中。对于电力系统而言,弹性力可用于评估电网对扰动的预防抵抗能力、故障过程中的迅速响应能力,以及电网的快速恢复能力,已成为电力工作者研究的新焦点^[21-22]。

变电站交流母线电压恢复至故障后交流母线稳定运行的最低电压所需时间和换相失败次数为关键特征,提出电压弹性力评估指标,可表示为:

$$R_V = \frac{1}{N_f} \sum_{i=1}^{N_f} R_{V,i} = \frac{1}{N_f} \sum_{i=1}^{N_f} e^{-\frac{T_i}{T_{\max}}} e^{-\frac{N_i}{N_{\max}}} \quad (1)$$

式中: R_V 为电网电压弹性系数; N_f 为近区交流线路短路故障数量; i 为短路故障序号; T_{\max} 为短路故障期间允许的电压低于 U_s 的最长时间; N_i 为短路故障 i 发生期间直流换相失败次数; N_{\max} 为直流闭锁的最大换相失败次数; T_i 为短路故障 i 期间换流站交流母线电压完全恢复至 U_s 所需的时间; U_s 为相关标准规定的故障后交流母线稳定运行的最低电压。

电压稳定属于电网局部问题,根据电网实际运行情况,各直流之间电气距离相对较远,其中任一回直流近区电网的短路故障对其余直流的影响较小。因此,弹性力指标以单回直流的电压和熄弧角变化特性作为直流落点近区电网电压弹性指标的计算依据。对于任一短路故障,综合考虑故障期间电压持续低于标准的时间和换相失败次数,通过与所允许的最大值进行计算,得到单个故障下的电压弹性系数。为综合考虑所有短路故障下电压的恢复能力,选择 N_f 个故障下的弹性系数平均值作为交直流受端电网的电压弹性评估指标。 R_V 指标结果范围为 $(0, 1]$,数值越大表明直流系统恢复至正常运行水平速度越快,电压弹性恢复力越强。

2 多动态无功装置协调运行优化模型

2.1 目标函数

$$f = \max R_V \quad (2)$$

式中: f 为文中模型的目标函数,即电压弹性指标最大化。

2.2 稳态运行约束

2.2.1 动态无功装置

动态无功装置的稳态无功出力约束为:

$$Q_{\min,l} \leq Q_l^{SS} \leq Q_{\max,l} \quad l = 1, 2, \dots, L \quad (3)$$

式中: l 为动态无功装置的序号; Q_l^{SS} 为动态无功装置 l 的稳态无功出力; $Q_{\max,l}, Q_{\min,l}$ 分别无功出力的上下限; L 为动态无功装置的数量。

2.2.2 潮流平衡约束

交流电网的潮流方程可表示为:

$$\Delta P_i = P_{Gi} - P_{Li} \pm P_{di} - U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (4)$$

$$\Delta Q_i = Q_{Gi} - Q_{Li} \pm Q_{di} - U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (5)$$

$$U_{\min,i} \leq U_i \leq U_{\max,i} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

式中: P_{Gi}, Q_{Gi} 分别为第 i 节点发电机的有功、无功功率,如无发电机, P_{Gi} 和 Q_{Gi} 为0; P_{Li}, Q_{Li} 分别为负荷有功功率、无功功率; P_{di}, Q_{di} 为交直流系统交换的有功和无功功率,整流侧取负,在逆变侧取正,如无直流接入, P_{di}, Q_{di} 为0; G_{ij}, B_{ij} 为交流导纳矩阵元素; U_i, U_j 为节点 i 和 j 的电压幅值; θ_{ij} 为节点 i 和 j 的电压相角差; n 为节点数量; $U_{\min,i}, U_{\max,i}$ 分别节点电压的上下限。式(4)和式(5)为功率平衡方程,节点功率以注入节点为正。

2.2.3 直流准稳态模型

以双端直流系统为例,如图1所示,则直流输电的潮流模型如式(7)一式(11)所示。

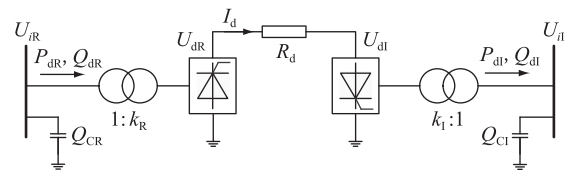


图1 双端直流系统流计算模型

Fig.1 Power flow model of two-terminal DC system

$$U_{dR} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} m_R k_R U_{rR} \cos \alpha - \frac{3}{\pi} m_R X_{cR} I_d \quad (7)$$

$$U_{dI} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} m_I k_I U_{rI} \cos \gamma - \frac{3}{\pi} m_I X_{cI} I_d \quad (8)$$

$$P_{dR} = U_{dR} I_d \quad (9)$$

$$P_{dI} = U_{dI} I_d \quad (10)$$

$$U_{dR} = U_{dI} + R_d I_d \quad (11)$$

式中: U_d 为直流电压; m 为桥数; k 为换流变压器变比; α 为整流侧触发角; γ 为逆变侧熄弧角; X_c 为等效换相电抗; I_d 为直流线路电流; P_d 为直流有功功率; Q_d 为无功损耗; Q_C 为无功补偿容量;下标R,I分

别表示整流侧和逆变侧。

2.3 暂态运行约束

2.3.1 动态无功装置

动态无功补偿装置的控制策略基本一致,如图2所示,分为定无功和定电压控制模式。

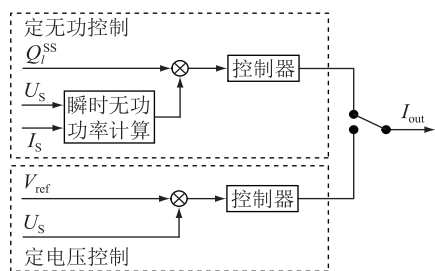


图2 动态无功补偿控制策略示意
Fig.2 Control strategy of dynamic reactive power devices

电网正常运行时,动态无功装置通常运行在定无功控制模式下,稳态无功出力 Q_i^{SS} 即文中模型的优化变量;当电网发生短路故障时,接入点电压降低时,自动切换至定电压控制模式,快速输出无功,提升电网电压恢复速度,可表示为:

$$I_{out} = \begin{cases} \varphi_{Q, const}(U_s) & U_s > U_{set} \\ \varphi_{V, const}(U_s) & U_s \leq U_{set} \end{cases} \quad (12)$$

式中: $\varphi_{Q, const}$, $\varphi_{V, const}$ 分别为定无功控制和定电压控制的微分方程,表示图2所示的控制器; U_{set} 为定无功和定电压控制模式切换的电压阈值,通常由设备厂家设置; I_{out} 为无功装置输出电流。

2.3.2 电网暂态运行

交直流混联电网的机电暂态模型为:

$$\varphi_{AC}(\dot{X}_{AC}, X_{AC}, Z_{AC}) = 0 \quad (13)$$

$$\varphi_{HVDC}(\dot{X}_{HVDC}, X_{HVDC}, Z_{HVDC}) = 0 \quad (14)$$

式中: φ_{AC} 表示交流电网侧的微分方程,包括发电机和负荷的暂态模型; X_{AC} 为状态变量; \dot{X}_{AC} 为状态变量的微分形式; Z_{AC} 为控制变量; φ_{HVDC} 为特高压直流控制模型等效微分方程; X_{HVDC} 为直流状态变量; \dot{X}_{HVDC} 为状态变量的微分形式; Z_{HVDC} 为直流控制变量。

3 求解流程

式(1)一式(14)组成文中提出的多动态无功装置协调运行优化模型,同时包含代数方程和微分方程。多个优化变量和控制变量,可表示为:

$$\min X \quad (15)$$

$$AX = b \quad (16)$$

$$F_d(X, \dot{Y}, Y) = 0 \quad (17)$$

式中: X 为优化变量组成的向量; Y 为控制变量组成的向量; \dot{Y} 为 Y 的微分形式; A, b 为代数方程的系数; F_d 为微分方程。

为得到目标函数中的电压弹性力指标,传统的数学优化算法不再适应,需采用时域仿真法对不同短路故障进行机电暂态仿真。粒子群算法主要通过群体中个体之间的协作和信息共享来寻找最优解,易实现且无众多参数调节,该方法较为成熟。文中采用 PSO 算法对上述非线性问题进行求解,具体流程如图3所示。

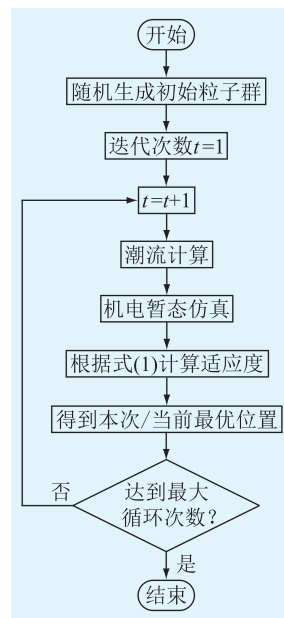


图3 求解流程

Fig.3 The flow chart of solution

4 仿真实验

为了验证文中提出的多动态无功装置运行优化方法的正确性和有效性,以实际江苏电网为例进行仿真计算。苏州南部电网作为江苏电网重要的负荷中心,主要依靠锦苏特高压直流以及梅里—木渎、熟南—斗山(陆桥)、东吴—全福和东吴—吴江南4个500 kV通道供电,区内电源数量较少,“空心化”特征导致电压稳定性较差。为改善电网电压稳定性,分别在苏州站、木渎站和吴江站装置了调相机、UPFC和STATCOM。动态无功装置具体信息如表1所示。

PSO算法通过Matlab编程实现,其中潮流计算采用MatPower 7.0,机电暂态仿真计算部分通过调用暂态计算模块实现,得到直流换流站交流母线电压及熄弧角变化曲线后,提取电压恢复和直流熄弧角关键特征后得到适应度目标函数。以“故障后直

表 1 动态无功装置数据

Table 1 The data of dynamic reactive power devices

序号	名称	位置	电压等级/kV	容量/(MV·A)
1	调相机	苏州站	500	300×2
2	STATCOM	吴江站	220	300
3	UPFC	木渎站	220	250(并联侧)

流换流站交流母线电压 200 ms 内提升至 0.85 p.u. 以上,且直流换相失败次数不大于 1 次”为要求,苏州换流站为中心,往外三级断面组成直流近区电网,选择 U_{set} 为 0.85 p.u.,直流换相次数 N_{max} 为 1, $N-2$ 故障数量为 36。

分别考虑以下 4 种算例:

算例 1:苏州南部电网接入调相机;

算例 2:苏州南部电网接入 STATCOM;

算例 3:苏州南部电网接入 UPFC;

算例 4:苏州南部电网接入调相机、STATCOM 和 UPFC。

在 4 种算例下,PSO 算法的具体参数、苏州南部电网 $N-2$ 故障数量等具体如表 2 所示,不同算例的最优目标如表 3 所示。

表 2 计算参数设置

Table 2 The setting parameters of PSO in four cases

参数	苏州南部电网			
	算例 1	算例 2	算例 3	算例 4
变量长度	2	1	1	4
粒子总数	10	10	10	20
迭代次数	20	20	20	40
$N-2$ 故障数量	36	36	36	36

表 3 各算例的优化目标

Table 3 The optimization objective in four test systems

目标函数	电压弹性
算例 1	0.112
算例 2	0.101
算例 3	0.095
算例 4	0.137

由表 3 可知,仅考虑单一动态无功装置接入时,调相机对于提升电网电压弹性力指标的效果最为明显,具体原因为:

(1) 接入位置。相比 STATCOM 和 UPFC,调相机直接接入苏州换流站 500 kV 交流母线,与直流系统之间的电气距离更短。短路故障期间,调相机可以快速提供动态无功,以提升换流站交流母线的电压恢复速度。

(2) 动态无功特性。与 FACTS 装置相比,调相

机短时过载能力更强,次暂态期间提供更多的无功功率,有效支撑电网电压恢复。

算例 4 的收敛曲线如图 4 所示。

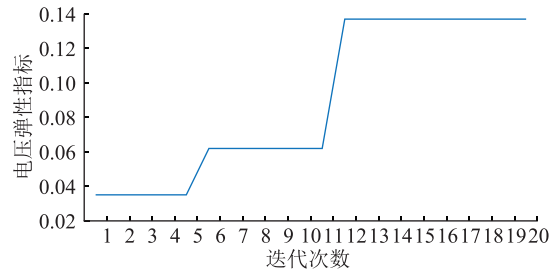


图 4 粒子群算法收敛曲线

Fig.4 Convergence curve of the PSO

由图 4 可知,初始状态下,粒子的最优目标函数为 0.031 2,即电网电压弹性力较小。随着粒子群的优化计算,电压弹性力指标最终达到 0.137,表明文中算法可有效优化动态无功装置的无功出力,提升电网电压稳定性。

动态无功补偿装置的最优无功出力如表 4 所示。算例 4 中,经过 12 次迭代寻优,3 种不同动态无功装置的最优无功出力如表 4 所示。

表 4 各算例无功装置的最优无功出力

Table 4 The optimal reactive power of DRPDs in four test systems

动态无功装置	最优无功出力			
	算例 1	算例 2	算例 3	算例 4
调相机	50.2			103.2
STATCOM		102.1		1.2
UPFC			75.5	51.3

图 5 和图 6 为同一三相短路故障时,算例 4 最优无功出力与任一无功出力策略(调相机:0 Mvar; STATCOM:0 Mvar; UPFC:0 Mvar)下的苏州站交流母线电压和熄弧角变化曲线对比情况。

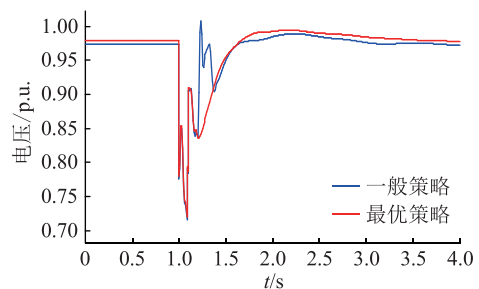


图 5 交流母线电压变化曲线

Fig.5 The comparison of the inverter station's AC bus voltage

由图 5 可知,通过优化控制策略,可有效提升故障后电压恢复速度,并减少 1 次直流换相失败,如图 6 所示,该策略有效提升了电压弹性力。

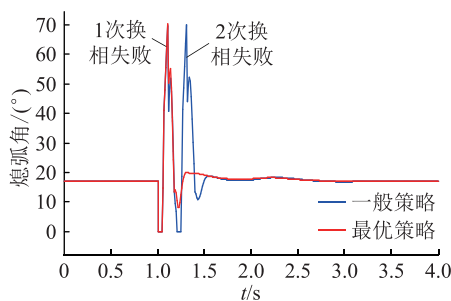


图6 直流熄弧角变化曲线

Fig.6 The comparison of the inverter station's extinction angle

5 结语

为提升受端电网暂态电压稳定性,文中提出一种多动态无功装置运行优化方法,以电网电压弹性力为优化目标,同时计及了故障后换流站交流母线电压的熄弧角关键特征。基于 PSO 智能算法进行优化,克服了模型同时含有微分方程约束的困难。通过苏州南部实际电网进行仿真验证,结果表明文中模型和优化算法的有效性。由仿真结果可知,通过文中方法,可有效减少故障后的直流换相失败次数、提升电网电压恢复速度,改善电网电压稳定性,为电网的优化运行提供新的方法。目前,根据实际电网运行情况,直流落点之间的距离相对较远,随着直流工程的不断投运,直流落点愈发密集,后续将对多直流密集馈入电网区的动态无功装置协调运行优化方法继续开展研究。

本文得到江苏省电力试验研究院有限公司科技项目“考虑极端故障的电力电子化电力系统弹性力评估技术研究”资助,谨此致谢!

参考文献:

[1] 王强,顾乔根,孙仲民,等. 计及出力波动的光伏电站无功支撑能力评估[J]. 电力工程技术,2020,39(2):29-34.
WANG Qiang, GU Qiaogen, SUN Zhongmin, et al. The evaluation of reactive power support capacity of photovoltaic power station considering output fluctuation[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(2): 29-34.

[2] 孙蓉,朱梓荣,卫志农,等. 计及 UPFC 的电力系统多阶段多目标无功优化算法[J]. 电力工程技术,2020,39(1):76-85.
SUN Rong, ZHU Zirong, WEI Zhinong, et al. Multi-objective and multi-stage reactive power optimization algorithm for power system considering UPFC[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(1): 76-85.

[3] 周芳,卿梦琪,唐飞,等. 动态无功补偿装置抑制直流换相失败能力影响因素研究[J]. 智慧电力,2019,47(3):77-83.
ZHOU Fang, QING Mengqi, TANG Fei, et al. Analysis on factors affecting ability of dynamic reactive power compensation device to eliminate DC commutation failure[J]. Smart Power, 2019, 47

(3):77-83.

[4] 罗天,汪可友,李国杰,等. 基于拉格朗日对偶松弛的多区域柔性直流互联电网无功优化[J]. 电力系统自动化,2019,43(11):68-76.
LUO Tian, WANG Keyou, LI Guojie, et al. Reactive power optimization in multi-area VSC-HVDC interconnected power grids based on Lagrangian dual relaxation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(11): 68-76.

[5] 陈中,严俊,朱政光,等. 多馈入交直流混联系统解耦安全域的刻画及应用[J]. 电力系统自动化,2020,44(22):37-44.
CHEN Zhong, YAN Jun, ZHU Zhengguang, et al. Characterization and application of decoupling security region in multi-infeed AC/DC hybrid system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(22): 37-44.

[6] 周勤勇,张彦涛,贺海磊,等. 多直流馈入电网动态无功补偿选点实用方法[J]. 电网技术,2014,38(7):1753-1757.
ZHOU Qinyong, ZHANG Yantao, HE Hailei, et al. A practical site selection method for dynamic reactive power compensation in multi-infeed DC power grid[J]. Power System Technology, 2014, 38(7): 1753-1757.

[7] 郑宽,沈沉,刘锋. 降低多回 HVDC 同时换相失败风险的交直流混联受端系统 STATCOM 配置方案[J]. 电网技术,2018,42(2):564-570.
ZHENG Kuan, SHEN Chen, LIU Feng. Configuration scheme of STATCOM for mitigating simultaneous commutation failure risk of multi-infeed HVDC links[J]. Power System Technology, 2018, 42(2): 564-570.

[8] CHEN L J, DENG Z L, XU X H. Two-stage dynamic reactive power dispatch strategy in distribution network considering the reactive power regulation of distributed generations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(2): 1021-1032.

[9] REHMAN A, GUO C Y, ZHAO C Y. Coordinated control for operating characteristics improvement of UHVDC transmission systems under hierarchical connection scheme with STATCOM[J]. Energies, 2019, 12(5): 945.

[10] 李镔,邵德军,徐友平,等. 基于新一代调相机的多目标无功电压协调控制系统研究[J]. 电网技术,2019,43(8):2961-2967.
LI Kai, SHAO Dejun, XU Youping, et al. Research on coordinated multi-objective reactive voltage control system based on new type synchronous condenser[J]. Power System Technology, 2019, 43(8): 2961-2967.

[11] 丁立国,沈阳武,许加柱,等. 连接弱交流系统的高压直流换流站无功补偿协调控制策略[J]. 电力系统自动化,2017,41(8):22-29.
DING Liguo, SHEN Yangwu, XU Jiazhu, et al. Coordinated control strategy of reactive compensation for HVDC converter station connected to weak AC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(8): 22-29.

[12] SHA J B, GUO C Y, REHMANA, et al. A quantitative index to evaluate the commutation failure probability of LCC-HVDC with a synchronous condenser[J]. Applied Sciences, 2019, 9

- (5):925.
- [13] JOVCIC D, PAHALAWATHTHA N, ZAVAHIR M. Investigation of the use of inverter control strategy instead of synchronous condensers at inverter terminal of an HVDC system [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(2):704-709.
- [14] 李兆伟, 吴雪莲, 曹路, 等. 抑制直流连续换相失败的调相机紧急控制[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(22):91-97.
LI Zhaowei, WU Xuelian, CAO Lu, et al. Emergency control of synchronous condenser to suppress DC continuous commutation failure [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(22):91-97.
- [15] PANDA A, TRIPATHY M, BARISAL A K, et al. A modified bacteria foraging based optimal power flow framework for Hydro-Thermal-Wind generation system in the presence of STATCOM [J]. Energy, 2017, 124:720-740.
- [16] KAZEMTABRIZI B, ACHA E. An advanced STATCOM model for optimal power flows using Newton's method [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(2):514-525.
- [17] SREEJITH S, SIMON S P, SELVAN M P. Analysis of FACTS devices on security constrained unit commitment problem [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2015, 66:280-293.
- [18] LUBURI Z, PAND I H. FACTS devices and energy storage in unit commitment [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019, 104:311-325.
- [19] LI J, LIU F, LI Z Y, et al. Impacts and benefits of UPFC to wind power integration in unit commitment [J]. Renewable Energy, 2018, 116:570-583.
- [20] TAHER M A, KAMEL S, JURADO F, et al. Optimal power flow solution incorporating a simplified UPFC model using lightning attachment procedure optimization [J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2020, 30(1):1-25.
- [21] 别朝红, 林雁翎, 邱爱慈. 弹性电网及其恢复力的基本概念与研究展望 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39(22):1-9.
BIE Zhaohong, LIN Yanling, QIU Aici. Concept and research prospects of power system resilience [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(22):1-9.
- [22] 唐文虎, 杨毅豪, 李雅晶, 等. 极端气象灾害下输电系统的弹性评估及其提升措施研究 [J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(7):2244-2254, 2403.
TANG Wenhui, YANG Yihao, LI Yajing, et al. Investigation on resilience assessment and enhancement for power transmission systems under extreme meteorological disasters [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(7):2244-2254, 2403.

作者简介:



赵欣

赵欣(1983),男,博士,讲师,研究方向为次同步振荡,无功优化,电力电子化电力系统(E-mail:zhaoxin@seu.edu.cn);

施祎辰(1995),男,硕士在读,研究方向为无功优化及电力电子技术在电力系统中的应用;

张宁宇(1985),男,博士,高级工程师,从事 FACTS 技术、电压稳定、电力系统优化与运行工作。

Operation optimization of multi-dynamic reactive power devices with voltage resilience

ZHAO Xin¹, SHI Yichen¹, ZHANG Ningyu²

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Jiangsu Electric Power Research Institute Co., Ltd., Nanjing 211103, China)

Abstract: For the purpose of improving voltage support capacity of receiving-end power grid and reducing the risk of high voltage direct current (HVDC) continuous commutation failure, this paper presents an optimization method for the operation of multi-dynamic reactive power devices. Firstly, considering the key characteristics of voltage recovery speed and extinction angle of HVDC after faults, the evaluation index of voltage resilience for receiving-end power grid is introduced to measure the voltage recovery ability. Then, taking the maximum voltage resilience as the optimization objective, a mathematical optimization model is established. In this model, the reactive power output of multi-dynamic reactive power devices is treated as the optimization variable, while the steady and transient constraints of power grid are included at the same time. In the end, particle swarm optimization (PSO) method is used for calculating in the proposed model. To testify the correctness of the model, Suzhou southern power grid is utilized to simulated. The result shows that it effectively improves the recovery speed of grid voltage after short-circuit fault and reduces the number of HVDC continuous commutation failure.

Keywords: dynamic reactive power devices; AC/DC hybrid power system; commutation failure; voltage resilience; coordinated operation

(编辑 李栋)