

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181122

计及 VSC 和 DFIG 的电网动态无功优化模型

范士雄¹, 韩巍¹, 刘幸蔚¹, 王玮², 张鹏², 沈晓东³, 刘彦³

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192; 2. 国家电网甘肃省电力公司, 甘肃 兰州 730050;
3. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 近年来, 一系列特高压直流工程的投运和大型风电场等新能源的并网给特高压近区电网无功控制带来了新的挑战。为解决含柔性直流的交直流混联电网的无功优化控制问题, 提出了含电压源换流器(Voltage Source Converter, VSC)并考虑双馈感应风机(Doubly-Fed Induction Generator, DFIG)无功支撑的动态无功优化模型。该模型以交直流电网全天网损最小为目标函数, 约束包括交直流系统的潮流约束、直流变量的控制约束、离散控制变量动态调节次数约束及节点电压的安全约束。原模型是一个多时段非线性混合整数规划问题, 缺乏快速有效的求解方法, 通过线性化技术将原模型转化为能有效求解的二阶锥规划(Second Order Cone Programming, SOCP)问题。以 IEEE30 节点系统为例, 通过仿真计算验证了所建模型和算法的有效性。

关键词: 高压直流; 电压源换流器; 动态无功优化; 二阶锥规划

A dynamic reactive power optimization model considering reactive power support of DFIG and VSC

FAN Shixiong¹, HAN Wei¹, LIU Xingwei¹, WANG Wei², ZHANG Peng², SHEN Xiaodong³, LIU Yan³

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 2. State Grid Gansu Electric Power Company, Lanzhou 730050, China; 3. College of Electrical Engineering and Information Technology, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: At present, along with the wide deployment of UHVDC in the power system and the connections of the high penetration of renewable energies for example large-scale wind farm, great challenges on reactive power optimization of UHVDC neighboring grid have appeared. In order to solve the reactive power optimization control issue for AC/DC hybrid power grid with flexible DC, this paper presents a dynamic reactive power optimization model with voltage source converter and considering reactive power support of the Doubly-Fed Induction Generator (DFIG). The objective function in the presented model is the minimum all-day network loss of the AC-DC grid. And also the model mainly considers four types of the constraints including the AC-DC system power flow constraints, the DC variables controlling constraints, the dynamic adjustment constraints of the discrete control variables, and the safety constraints of the node voltage. However, the model is a multi-period nonlinear mixed integer programming problem, which is tremendously difficult to be solved. As a result, by employing the linearization technology, the original model can be converted in to a second-order cone programming problem which can be efficiently solved. The evaluations have been carried out using the IEEE-30 bus system. The experiment results show the effectiveness of the presented model for dealing with the reactive power optimization task.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFB0903300) and Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. DZ71-17-023).

Key words: high voltage direct current (HVDC); voltage source converter (VSC); dynamic reactive power optimization; second order cone programming (SOCP)

0 引言

大力发展新能源是我国保障能源供应安全、应

对气候变化、治理雾霾、实现未来可持续发展的必由之路。由于新能源资源与中东部能源消费中心呈逆向分布, 因此必须通过远距离输电以实现新能源在全国范围的配置和消纳。2018 年底我国“九交九直”特高压输电工程将全部建成投运, 使新能源的深度开发和高效利用进入新阶段^[1-3]。随着一系列特

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2017YFB0903300);
国家电网公司科技项目资助(DZ71-17-023)

高压直流工程的投运, 我国跨区域互联电网“强直弱交”的特点越发明显。特高压近区网架结构薄弱, 直流系统运行方式改变、交流通道潮流变化以及大规模间歇性新能源发电的波动都会引起系统电压的大幅变化, 使得系统电压质量恶化, 造成交直流外送通道功率震荡、新能源发电大面积脱网、系统失稳等后果。因而特高压大电网背景下交直流系统无功电压控制问题受到普遍关注^[4-9]。

直流输电线路的传输功率及运行方式较交流线路具有较强的可控性, 相应为交直流并联输电线路的潮流优化控制提供了有利的控制手段。文献[10]提出了交直流系统的无功优化二次模型, 并采用内点法进行求解, 但没有考虑控制变量的离散性。文献[11]在文献[10]的基础上考虑直流输电线路的运行特性, 建立了交直流系统的动态无功优化模型。该模型为多阶段非线性混合整数规划, 文章采用复合智能优化算法进行求解。文献[12]基于奇异值分解和预测-校正原对偶内点法, 提出了一种交直流系统无功优化策略。文献[13]以交直流互联系统有功损耗和所有关键节点电压偏差平方和最小化为目标, 建立交直流互联系统的多目标无功优化模型, 并提出一种求其帕累托最优解的改进规格化法平面约束法。文献[14]为避免直流功率的频繁调节, 建立了考虑直流调节次数限制的交直流系统动态无功优化模型, 并应用广义 Benders 分解方法求解。文献[15]建立了同时考虑静态和暂态电压稳定性的交直流混联系统综合无功规划选址和容量优化方法。

电压源型换流器(VSC)具有有功无功独立调节、可向无源网络供电、可控性好和运行方式灵活的特点, 解决了传统高压直流输电技术的诸多固有瓶颈, 近年来已成为了众多学者的研究热点^[16-22]。文献[16]在分析电压源型直流输电(VSC-HVDC)的稳态功率特性及控制方式基础上, 构建了适用于牛顿法潮流计算的数学模型, 并提出了一种交直流混合系统潮流的交替求解算法。文献[18]采用原对偶内点法和预测校正内点法对含 VSC-HVDC 的交直流系统进行了优化, 但未考虑离散变量的处理, 且直流控制量并未参与优化。文献[23]利用二阶锥规划求解含电压源换流器的交直流最优潮流。首先使用近似技术将含电压源换流器的交直流最优潮流模型转换为二阶锥形式, 然后使用内点法进行求解。文献[24]建立含 VSC-HVDC 的传输网和主动配电网协调的最优潮流(Optimal Power Flow, OPF)模型, 以优化调度两个网络的机组出力和电压调整。求解过程中, 利用二阶锥规划松弛混合系统中的非凸可行域, 同时保证两个网络的其他物理约束。文

献[25]为解决含柔性直流的交直流混联电网的无功优化控制问题, 提出了一个含电压源换流器的无功优化模型, 并采用分支定界法及原对偶内点法求解。

综上问题与分析, 本文建立了含 VSC 和 DFIG 的电网动态无功优化模型。该模型针对 VSC-HVDC 的特点, 以系统全天总网损为优化目标, 有载调压变压器分接头(On Load Tap Changers, OLTC)、离散与连续无功补偿装置等设备调节限制为约束条件, 同时考虑双馈风机的无功支撑能力。此模型在数学上需要求解非线性非凸优化问题; 为提高全局寻优能力及计算效率, 设计了线性化方法, 利用二阶锥规划松弛非凸可行域, 从而使得模型可靠快速求解。

1 计及 VSC 和 DFIG 的交直流系统数学模型

1.1 交流潮流模型

为了后续求解方便, 电网设备模型均采用线性化的方式建模。交直流潮流等式约束均采用类似 Distflow 支路潮流的方式建模。

对于交流系统任一节点 j

$$P_{j,t} = \sum_{k \in \delta(j)} P_{jk,t} - \sum_{i \in \pi(j)} (P_{ij,t} - r_{ij} \tilde{I}_{ij,t}) + g_j \tilde{V}_{j,t}, \quad (1)$$

$$\forall t, \forall j \in AC_B$$

$$Q_{j,t} = \sum_{k \in \delta(j)} Q_{jk,t} - \sum_{i \in \pi(j)} (Q_{ij,t} - x_{ij} \tilde{I}_{ij,t}) + b_j \tilde{V}_{j,t}, \quad (2)$$

$$\forall t, \forall j \in AC_B$$

$$\tilde{V}_{j,t} = \tilde{V}_{i,t} - 2(P_{ij,t} r_{ij} + Q_{ij,t} x_{ij}) + \tilde{I}_{ij,t} (r_{ij}^2 + x_{ij}^2), \quad (3)$$

$$\forall ij \in AC_E$$

$$\tilde{I}_{ij,t} = \frac{P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2}{\tilde{V}_{i,t}}, \quad \forall t, \forall ij \in AC_E \quad (4)$$

$$P_{j,t} = P_{j,t}^g + P_{j,t}^w - P_{j,t}^l \quad (5)$$

$$Q_{j,t} = Q_{j,t}^g + Q_{j,t}^w + Q_{j,t}^c + Q_{j,t}^{cb} - Q_{j,t}^l \quad (6)$$

式中: t 为时刻; $\tilde{V}_{i,t} = V_{i,t}^2$, $\tilde{I}_{ij,t} = I_{ij,t}^2$, $I_{ij,t}$ 为 t 时刻支路 ij 上的电流; $V_{i,t}$ 为 t 时刻节点 i 的电压幅值; AC_B , AC_E 分别为交流系统中的节点和支路集合; $\delta(j)$ 表示以 j 为首端节点的支路末端节点集合; $\pi(j)$ 表示以 j 为末端节点的支路首端节点集合; r_{ij} 和 x_{ij} 分别为支路 ij 的电阻和电抗值; g_j 和 b_j 分别为节点 j 的电导和电纳值; $P_{j,t}$ 和 $Q_{j,t}$ 分别为 t 时刻节点 j 的有功和无功注入功率; $P_{j,t}^g$ 和 $Q_{j,t}^g$ 分别为 t 时刻节点 j 上的发电机有功和无功出力; $P_{j,t}^w$ 和 $Q_{j,t}^w$ 分别为节点 j 的风机 t 时刻有功和无功出力; $P_{j,t}^l$ 和

$Q_{j,t}^L$ 分别为 t 时刻节点 j 上的负荷有功和无功; $Q_{j,t}^C$ 表示 t 时段节点 j 上连续型无功补偿装置的无功补偿量; $Q_{j,t}^{CB}$ 表示 t 时段节点 j 电容器组的无功补偿量。式(1)表示有功平衡约束; 式(2)表示无功平衡约束; 式(3)是功率电压关系; 式(4)是功率电流关系; 式(5)表示节点有功注入; 式(6)表示节点无功注入。

1.2 直流潮流模型

对于直流系统任一节点 j

$$P_{dc,j,t} = \sum_{k \in \delta(j)} P_{dc,jk,t} - \sum_{i \in \pi(j)} (P_{dc,ij,t} - r_{dc,ij} \tilde{I}_{dc,ij,t}), \quad (7)$$

$$\forall t, \forall j \in DC_B$$

$$\tilde{V}_{dc,j,t} = \tilde{V}_{dc,i,t} - 2P_{dc,ij,t} r_{dc,ij} + \tilde{I}_{dc,ij,t} r_{dc,ij}^2, \quad (8)$$

$$\forall ij \in DC_E$$

$$\tilde{I}_{dc,ij,t} = \frac{P_{dc,ij,t}^2}{\tilde{V}_{dc,i,t}}, \quad \forall t, \forall ij \in DC_E \quad (9)$$

$$P_{dc,j,t} = P_{dc,j,t}^g + P_{dc,j,t}^w - P_{dc,j,t}^l \quad (10)$$

式中: 令 $\tilde{V}_{dc,i,t} = V_{dc,i,t}^2$, $\tilde{I}_{dc,ij,t} = I_{dc,ij,t}^2$; DC_B , DC_E 分别为直流系统中的节点和支路集合; $r_{dc,ij}$ 为直流支路 ij 的电阻; $\tilde{I}_{dc,ij,t}$ 为直流支路 ij 上的电流的平方; $\tilde{V}_{dc,i,t}$ 为直流节点 i 的电压的平方; $P_{dc,j,t}^g$, $P_{dc,j,t}^w$, $P_{dc,j,t}^l$ 分别为直流网络中节点 j 的有功注入功率、发电机有功出力、风机有功出力、节点 j 的负荷有功。

1.3 VSC 换流站模型(图 1)

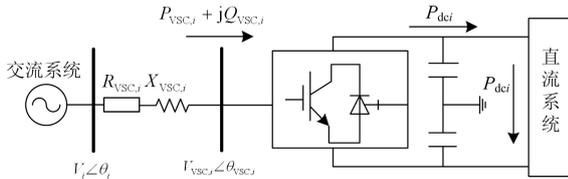


图 1 VSC 换流站模型

Fig. 1 VSC converter station model

图中: $V_i \angle \theta_i$ 为第 i 个换流站与交流系统连接处的电压; $V_{VSC,i} \angle \theta_{VSC,i}$ 为输入第 i 个 VSC 的电压; $R_{VSC,i}$ 为第 i 个换流站内部损耗的等效电阻; $X_{VSC,i}$ 为第 i 个换流站中滤波器的等效电抗; $P_{VSC,i} + jQ_{VSC,i}$ 为输入第 i 个 VSC 换流桥的复功率; $P_{dc,i}$ 为第 i 个 VSC 输出的直流功率; $V_{dc,i}$ 为第 i 个 VSC 输出的直流电压。

本文将换流站阻抗 $R_{VSC,i} + jX_{VSC,i}$ 等效为交流支路, 合并入交流系统处理, 所以输入 VSC 的有功功率与 VSC 输出的直流功率相等, 即

$$P_{VSC,i,t} = P_{dc,i,t}, \quad \forall t, \forall i \in VSC_B \quad (11)$$

式中, VSC_B 为直流系统中含 VSC 的节点集合; 此外, 输入第 i 个 VSC 的相电压 $V_{VSC,i,t} \angle \theta_{VSC,i,t}$ 与输出的直流电压 $V_{dc,i,t}$ 满足如下关系^[16,26]:

$$V_{VSC,i,t} = \frac{\sqrt{3}}{2} \mu M_{i,t} V_{dc,i,t}, \quad \forall t, \forall i \in VSC_B \quad (12)$$

式中: μ 为直流电压利用率 ($0 \leq \mu \leq 1$, 调整方式为 SPWM 时, $\mu = \frac{\sqrt{3}}{2}$; 调整方式为 SVPWM 时, $\mu = 1$); M 为调制度。本文取 $\mu = \frac{\sqrt{3}}{2}$, 设定 M 的取值范围为 $0 \leq M \leq 1$ 。

1.4 OLTC 模型

OLTC 模型的模型如图 2 所示, 引入虚拟节点 o , 支路 mo 的等效阻抗为 $z_{mo} = r_{mo} + jx_{mo}$, 视为常规的交流支路处理。虚拟节点 o 的电压为

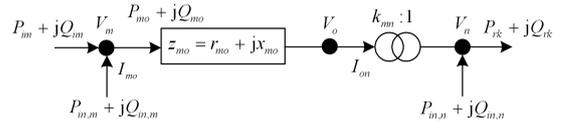


图 2 含 OLTC 的支路潮流模型

Fig. 2 Branch flow model with OLTC

$$\tilde{V}_{o,t} = k_{mn}^2 \tilde{V}_{n,t}, \quad \forall t, \forall o \in B^{oltc} \quad (13)$$

式中: B^{oltc} 为包含 OLTC 的虚拟节点集合; k_{mn} 为支路 mn 中 OLTC 的可调变比, 其为离散型变量; $\tilde{V}_{o,t}$ 和 $\tilde{V}_{n,t}$ 分别为节点 o 和 n 电压幅值的平方; 令 $K_{o,t} = k_{mn}^2$, 则

$$\tilde{V}_{o,t} = K_{o,t} \tilde{V}_{n,t}, \quad \forall t, \forall o \in B^{oltc} \quad (14)$$

$K_{o,t}$ 可线性化表达为

$$K_{o,t} = \underline{K}_o + \sum_m \Delta K_{o,m} \sigma_{o,t,m}^{OLTC}, \quad \forall t, \forall o \in B^{oltc} \quad (15)$$

式中: \underline{K}_o 表示 OLTC 变比平方的下限; $\Delta K_{o,m}$ 表示调节步长的平方; $\sigma_{o,t,m}^{OLTC}$ 为调节的 0-1 标识, 则

$$\sigma_{o,t,SR_o}^{OLTC} \leq \sigma_{o,t,2}^{OLTC} \leq \sigma_{o,t,1}^{OLTC} \quad (16)$$

$$\delta_{o,t}^{OLTC,IN} + \delta_{o,t}^{OLTC,DE} \leq 1 \quad (17)$$

$$\sum_m \sigma_{o,t,m}^{OLTC} - \sum_m \sigma_{o,t-1,m}^{OLTC} \geq \delta_{o,t}^{OLTC,IN} - \delta_{o,t}^{OLTC,DE} SR_o \quad (18)$$

$$\sum_m \sigma_{o,t,m}^{OLTC} - \sum_m \sigma_{o,t-1,m}^{OLTC} \leq \delta_{o,t}^{OLTC,IN} SR_o - \delta_{o,t}^{OLTC,DE} \quad (19)$$

$$\sum_{t \in T} (\delta_{o,t}^{OLTC,IN} + \delta_{o,t}^{OLTC,DE}) \leq \bar{N}_o^{OLTC}, \quad \forall t, \forall o \in B^{oltc} \quad (20)$$

式中, $\delta_{o,t}^{OLTC,IN}$ 和 $\delta_{o,t}^{OLTC,DE}$ 表示 OLTC 档位调节变化

0-1 标识, 若 $\delta_{o,t}^{\text{OLTC,IN}} = 1$, 则 OLTC 档位值在第 t 时段比第 $t-1$ 时段档位大, $\delta_{o,t}^{\text{OLTC,DE}}$ 同理, SR_o 为档位最大变化范围, \bar{N}_o^{OLTC} 为 T 时段内 OLTC 档位最大允许调节次数。

1.5 无功补偿装置模型

1) 连续型无功补偿(Static Var Compensator, SVC)模型

$$\underline{Q}_{j,t}^C \leq Q_{j,t}^C \leq \bar{Q}_{j,t}^C, \forall j \in B^C \quad (21)$$

式中: $\underline{Q}_{j,t}^C$ 和 $\bar{Q}_{j,t}^C$ 分别表示连续型无功补偿设备无功补偿量的最小值和最大值; B^C 表示包含连续型无功补偿设备的节点集合。

2) 离散型电容器组模型

$$Q_{j,t}^{\text{CB}} = \sigma_{j,t}^{\text{CB}} Q_j^{\text{CB,step}}, \forall t, \forall j \in B^{\text{CB}} \quad (22)$$

$$\delta_{j,t}^{\text{CB,IN}} + \delta_{j,t}^{\text{CB,DE}} \leq 1, \forall t, \forall j \in B^{\text{CB}} \quad (23)$$

$$\sum_{t \in T} (\delta_{j,t}^{\text{CB,IN}} + \delta_{j,t}^{\text{CB,DE}}) \leq N_{\text{max},j}^{\text{CB}}, \forall t, \forall j \in B^{\text{CB}} \quad (24)$$

$$\sigma_{j,t}^{\text{CB}} - \sigma_{j,t-1}^{\text{CB}} \leq \delta_{j,t}^{\text{CB,IN}} Y_{\text{max},j}^{\text{CB}} - \delta_{j,t}^{\text{CB,DE}}, \forall t, \forall j \in B^{\text{CB}} \quad (25)$$

$$\sigma_{j,t}^{\text{CB}} - \sigma_{j,t-1}^{\text{CB}} \geq \delta_{j,t}^{\text{CB,IN}} - \delta_{j,t}^{\text{CB,DE}} Y_{\text{max},j}^{\text{CB}}, \forall t, \forall j \in B^{\text{CB}} \quad (26)$$

式中: B^{CB} 为含离散型电容器组的节点集合; $\sigma_{j,t}^{\text{CB}}$ 为投运组数, 其为离散变量; $Q_j^{\text{CB,step}}$ 为每组的补偿功率; $\delta_{j,t}^{\text{CB,IN}}$ 和 $\delta_{j,t}^{\text{CB,DE}}$ 是表示投切操作的 0-1 标识, 若 $\delta_{j,t}^{\text{CB,IN}} = 1$, 则表示在 t 时段节点 j 增加一组 CB 投运, $\delta_{j,t}^{\text{CB,DE}}$ 同理; $N_{\text{max},j}^{\text{CB}}$ 表示在 T 时段投切次数的最大值; $Y_{\text{max},j}^{\text{CB}}$ 表示每次节点 j 投切组数的最大值。

1.6 双馈风机模型

大规模风电接入后无功电压稳定控制程度将成为影响局部地区功率送出能力的重要因素。传统的优化模型中一般采用恒定功率因数控制方式, 将风机无功出力视为定值, 无法充分反映风机无功输出特性。本文利用风机的容量曲线, 分析其无功支撑能力。风机的有功无功出力特性如图 3 所示, 利用线性化处理方法可得双馈风机的模型^[27], 即为

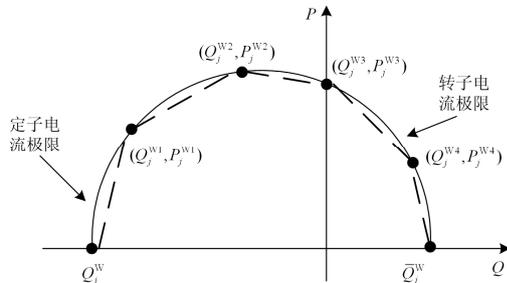


图 3 双馈风机容量曲线

Fig. 3 Capability curve of DFIG-based wind turbines

$$P_{j,t}^W \leq \frac{P_{j,t}^{W1}}{Q_j^{W1} - \underline{Q}_j^W} (Q_{j,t}^W - \underline{Q}_j^W) \quad (27)$$

$$P_{j,t}^W \leq \frac{P_j^{W2} - P_j^{W1}}{Q_j^{W2} - \underline{Q}_j^{W1}} (Q_{j,t}^W - Q_j^{W1}) + P_j^{W1} \quad (28)$$

$$P_{j,t}^W \leq \frac{P_j^{W3} - P_j^{W2}}{Q_j^{W3} - \underline{Q}_j^{W2}} (Q_{j,t}^W - Q_j^{W2}) + P_j^{W2} \quad (29)$$

$$P_{j,t}^W \leq \frac{P_j^{W4} - P_j^{W3}}{Q_j^{W4} - \underline{Q}_j^{W3}} (Q_{j,t}^W - Q_j^{W3}) + P_j^{W3} \quad (30)$$

$$P_{j,t}^W \leq \frac{P_j^{W4}}{Q_j^{W4} - \underline{Q}_j^{W3}} (Q_{j,t}^W - \bar{Q}_j^W) \quad (31)$$

式中: $P_{j,t}^W$ 和 $Q_{j,t}^W$ 分别为双馈风机在时刻 t 下的有功和无功出力; $(\underline{Q}_j^W, 0)$ 、 (Q_j^{W1}, P_j^{W1}) 、 (Q_j^{W2}, P_j^{W2}) 、 (Q_j^{W3}, P_j^{W3}) 、 (Q_j^{W4}, P_j^{W4}) 和 $(\bar{Q}_j^W, 0)$ 分别为双馈风机在图中相应的 6 个特征点。

2 计及 VSC-HVDC 的电网无功优化模型

2.1 目标函数

无功优化以系统网损最小化为优化目标, 即

$$\min \sum_{t=1}^T P_t^{\text{loss}} = \sum_{t=1}^T \sum_{ij \in E} (r_{ij} \tilde{I}_{ij,t}) \quad (32)$$

式中: T 为总时段数; P_t^{loss} 为 t 时刻网络的总损耗; E 为交直流支路集合。

2.2 电网运行约束

计及 VSC 和 DFIG 的电网运行方程见式(1)式—式(6), 式(7)式—式(10), 式(11)式—式(12), 式(13)式—式(20), 式(21)式—式(26), 式(27)式—式(31)。

2.3 电网安全约束

考虑的安全约束包括交流节点电压幅值约束以及交流支路载流量约束, 直流节点电压约束、直流线路载流量约束, 换流站载流量约束、换流站无功调节量的约束, OLTC 分解头调节范围约束, 电容器调节容量约束。OLTC 分解头调节次数约束与离散电容器调节次数约束已经在电网运行约束中考虑, 此处不再计及。以上约束的数学表达式为

$$V_{j,t}^2 \leq \tilde{V}_{j,t}^2 \leq \bar{V}_{j,t}^2, \forall t, \forall j \in AC_B \quad (33)$$

$$I_{ij,t}^2 \leq \tilde{I}_{ij,t}^2 \leq \bar{I}_{ij,t}^2, \forall t, \forall ij \in AC_E \quad (34)$$

$$V_{\text{dc},j,t}^2 \leq \tilde{V}_{\text{dc},j,t}^2 \leq \bar{V}_{\text{dc},j,t}^2, \forall t, \forall j \in DC_B \quad (35)$$

$$I_{\text{dc},ij,t}^2 \leq \tilde{I}_{\text{dc},ij,t}^2 \leq \bar{I}_{\text{dc},ij,t}^2, \forall t, \forall ij \in DC_E \quad (36)$$

$$V_{\text{VSC},j,t}^2 \leq \tilde{V}_{\text{VSC},j,t}^2 \leq \bar{V}_{\text{VSC},j,t}^2, \forall t, \forall j \in VSC_B \quad (37)$$

$$\tilde{I}_{\text{VSC},ij,t} = \frac{P_{\text{VSC},ij,t}^2 + Q_{\text{VSC},ij,t}^2}{\tilde{V}_{\text{VSC},ij,t}}, \forall t, \forall ij \in VSC_E \quad (38)$$

$$\underline{I}_{VSC,ij,t}^2 \leq \tilde{I}_{VSC,ij,t} \leq \bar{I}_{VSC,ij,t}^2, \forall t, \forall ij \in VSC_E \quad (39)$$

$$\underline{Q}_{VSC,j,t} \leq Q_{VSC,j,t} \leq \bar{Q}_{VSC,j,t}, \forall t, \forall j \in VSC_B \quad (40)$$

$$\underline{V}_o^2 \leq \tilde{V}_{o,t} \leq \bar{V}_o^2, \forall t, \forall o \in B^{oltc} \quad (41)$$

$$\underline{K}_o \leq K_{o,t} \leq \bar{K}_o, \forall t, \forall o \in B^{oltc} \quad (42)$$

式中: 令 $\tilde{V}_{VSC,ij,t} = V_{VSC,ij,t}^2$, $\tilde{I}_{VSC,ij,t} = \tilde{I}_{VSC,ij,t}^2$; $\underline{V}_{j,t}$ 和 $\bar{V}_{j,t}$, $\underline{V}_{dc,j,t}$ 和 $\bar{V}_{dc,j,t}$, $\underline{V}_{VSC,j,t}$ 和 $\bar{V}_{VSC,j,t}$, $\underline{V}_{o,t}$ 和 $\bar{V}_{o,t}$ 分别表示交流节点、直流节点、VSC 节点、变压器虚拟节点电压下限和上限; $\underline{I}_{ij,t}$ 和 $\bar{I}_{ij,t}$, $\underline{I}_{dc,ij,t}$ 和 $\bar{I}_{dc,ij,t}$, $\underline{I}_{VSC,ij,t}$ 和 $\bar{I}_{VSC,ij,t}$ 分别表示 t 时段交流支路、直流支路、VSC 支路电流下限和上限; $\underline{Q}_{VSC,j,t}$ 和 $\bar{Q}_{VSC,j,t}$ 表示第 j 个 VSC 换流站无功调节下限和上限。

3 SOCP 松弛的电网无功优化模型

在第 1 部分中, 6 种设备模型均采用线性化的方式建模, 但仍存在如下非线性关系需要处理:

- 1) 交流网络的潮流约束, 即式(4);
- 2) 直流网络的潮流约束, 即式(9);
- 3) 换流站电压关系约束, 即式(12);
- 4) 交直流混合配电系统中交流支路、换流站的载流量约束, 即式(38)。

式(4), 式(9)和式(38)利用 SOCP 松弛可进一步处理为

$$\left\| \begin{array}{c} 2P_{ij,t} \\ 2Q_{ij,t} \\ \tilde{I}_{ij,t} - \tilde{V}_{j,t} \end{array} \right\|_2 \leq \tilde{I}_{ij,t} + \tilde{V}_{j,t}, \quad \forall ij \in AC_E \quad (43)$$

$$\left\| \begin{array}{c} 2P_{dc,ij,t} \\ \tilde{I}_{dc,ij,t} - \tilde{V}_{dc,j,t} \end{array} \right\|_2 \leq \tilde{I}_{dc,ij,t} + \tilde{V}_{dc,j,t}, \quad \forall ij \in DC_E \quad (44)$$

$$\left\| \begin{array}{c} 2P_{VSC,ij,t} \\ 2Q_{VSC,ij,t} \\ \tilde{I}_{VSC,ij,t} - \tilde{V}_{VSC,j,t} \end{array} \right\|_2 \leq \tilde{I}_{VSC,ij,t} + \tilde{V}_{VSC,j,t}, \quad \forall ij \in VSC_E \quad (45)$$

通过对原非线性式松弛转为二阶锥约束, 便于快速求解。

式(12)中, 由于 $0 \leq M \leq 1$ 及 $\mu = \frac{\sqrt{3}}{2}$, 式(12)可以等效为如下的线性约束^[26]:

$$V_{VSC,ij,t} \leq 0.5V_{dc,ij,t}, \quad \forall i \in VSC_B \quad (46)$$

经过上述变形后, 原问题的 SOCP 松弛模型为

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{目标函数 式(32)} \\ \text{s.t. 式(1)一式(3), 式(5), 式(6), 式(43)} \\ \text{式(7)一式(8), 式(10), 式(44)} \\ \text{式(11), 式(46)} \\ \text{式(14)一式(20), 式(21)一式(26), (27)一式(31)} \\ \text{式(33)一式(37), 式(39)一式(42), 式(45)} \end{array} \right. \quad (47)$$

经过 SOCP 松弛后式(47)为一个含混合整数变量的二阶锥动态无功优化问题, 现有的 Cplex, Gurobi, Mosek 等算法软件包可以通过割平面法或者分支定界法获得原问题的全局最优解, 由于该模型是一个凸规划模型, 与基于原交直流潮流方程的非凸规划模型相比, 具有更好的计算效率和收敛特性。

4 算例分析

4.1 算例数据

本文测试的硬件环境为英特尔四核 i5-4460、3.2 GHz、内存为 8 GB 的 PC。软件环境为 Matlab R2016a, 并内嵌 YALMIP 混合整数优化工具箱调用 CPLEX12.6 版本。

本文采用修改的 IEEE 30 节点系统为算例进行分析。在原算例上修改如下。

- 1) 将节点 2 和 6 之间、节点 1 和 18 之间分别新增一条直流支路。参数见表 1。

表 1 直流支路参数

Table 1 Branch parameters in DC network		
F_{bus}	T_{bus}	电阻/p.u.
2	6	0.037
1	18	0.047

- 2) 负荷数据以 IEEE 30 节点的负荷量为基准值, 将各个时段的负荷预测量折算成基准负荷量的比例, 可得到 0:00—24:00 的负荷比例因子如图 4 所示, 考虑负荷的无功和负荷有功同比例增加。

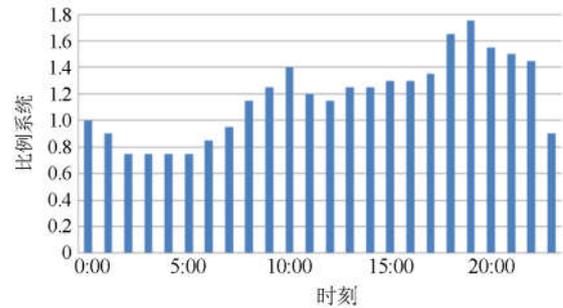


图 4 典型日负荷曲线

Fig. 4 Representative daily load curve

3) 将节点 5 的常规机组改为风电厂, 等效的风机特征点为(40 MW, -20 Mvar), (60 MW, -10 Mvar), (100 MW, 0 Mvar), (50 MW, 5 Mvar)。

4) 离散无功补偿(电容器组), 连续无功补偿(SVC)和有载调压变压器的参数如表 2—表 4 所示。

表 2 电容器组参数

Table 2 Parameters of capacitor banks

编号	节点	容量上限/ Mvar	调节步长/ Mvar	动作次数
1	10	+30	2	5
2	24	+30	3	4

表 3 SVC 参数

Table 3 Parameters of SVC

编号	节点	容量上限/Mvar	容量下限/Mvar
1	14	+30	-10

表 4 变压器参数

Table 4 Parameters of OLTC

编号	支路	调节上限	调节下限	调节步长	动作次数
1	6-10	0.9	1.1	0.025	4
2	27-29	0.9	1.1	0.025	5
3	12-16	0.9	1.1	0.025	5
4	21-22	0.9	1.1	0.025	4

5) 安装的 4 个 VSC 换流站配置参数相同, R_{VSC} 和 X_{VSC} 折算为标么值分别为: 0.006 和 0.013。

4.2 优化结果

1) 降损效果分析

表 5 的数据是优化计算结果与原始网损的对比。其中, 原始网损为一天 24 个时间断面损耗的累加。从中可以看出动态无功优化的降损效果很明显, 优化前的总电能损耗率为 5.26%, 而优化后网损率为 3.41%, 降损率达到了 1.85%。值得指出的是, 上述优化后的网损量大小是在固定电容器投切状态和机组无功出力(本文方法优化的结果)后, 基于交直流潮流方程进行潮流计算后得到的结果, 从而确保了网损计算结果的准确性。图 5 给出了优化前后全天系统网损比较。从图中可以看出, 经过动态无功优化, 各时段都有不同程度的网损减少, 其变化趋势与系统标么负荷曲线基本一致。通过本文方法的计算, 该系统无功潮流分布得到了优化, 可以得到更加经济合理的电网运行状态。

表 5 优化前后系统网损

Table 5 Comparison of initial states and results of optimization

初始网损/MW	网损率	优化后网损/MW	优化后网损率
403.07	5.26%	261.40	3.41%

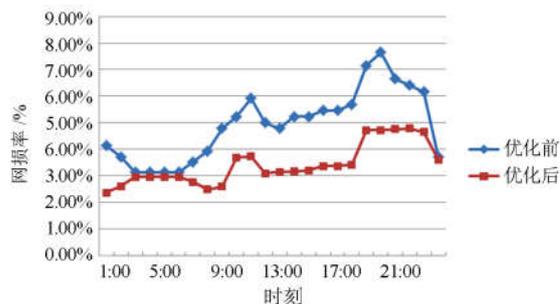


图 5 优化前后系统网损比较

Fig. 5 Comparison of the system loss before and after optimization in a day

2) 控制变量结果分析

离散电容器组和变压器分接头在各时段的投切情况如图 6 和图 7 所示。从图中可以看出, 根据负荷水平的变化, 2 套离散电容器组和 4 台变压器都起到了有效的作用, 系统无功分布通过电容器组及变压器分接头的投切和得到了合理调整。同时, 所有 2 套电容器组和 4 台变压器分接头的动作次数均满足约束条件, 计算结果可以在实际系统中执行。

图 8 和图 9 给出了系统全天的交直流并联线路的最优分配功率和直流节点电压的优化分布策略。从图中可以看出不同时段交直流断面传输的总有功功率不同, 直流并联线路分配的功率也不同。因此,

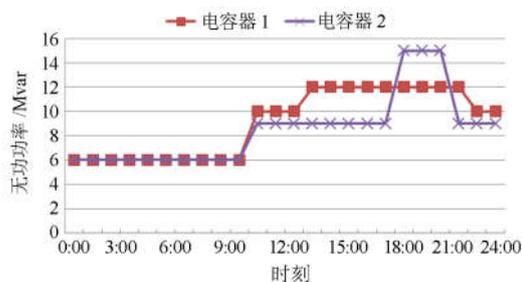


图 6 离散电容器组全天投切情况

Fig. 6 Whole day switching operations of discrete capacitors sets

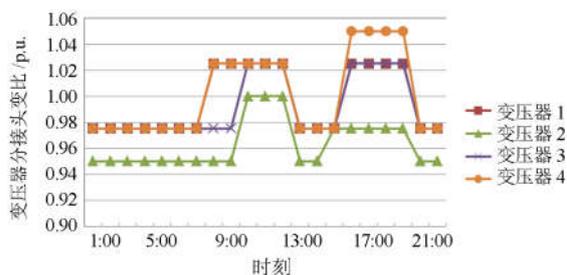


图 7 变压器分接头全天投切情况

Fig. 7 Whole day switching operations of transformer tap

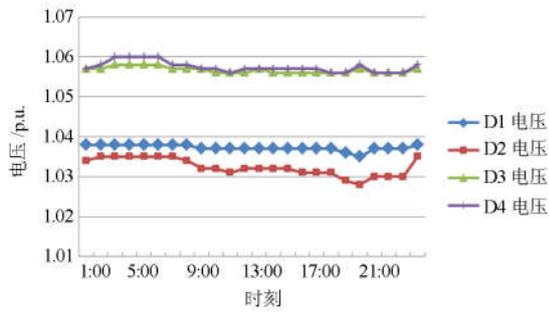


图 8 直流节点电压分布

Fig. 8 Curve of DC node voltage

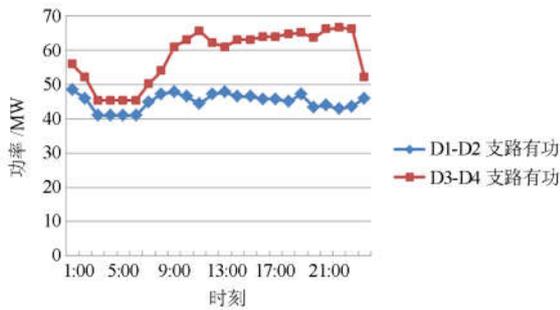


图 9 直流支路功率变化

Fig. 9 Curve of power flow of the DC branch

在无功优化中，为了达到网损最小的目标，应调节直流线路的传输功率，而不能采用定功率控制方式维持直流功率不变。文献[23]的研究进一步表明：直流输电系统为了满足传输功率变化的要求，需要协调控制换流站的调节设备，以使系统达到最优状态。因此，文献[23]建议在优化之前不要设定 VSC 的控制模式，而将其作为优化变量，根据优化后的结果来设定控制模式。

3) VSC 的影响分析

图 10 给出了换流站并网注入交流系统的无功功率曲线。从图中可以看出，优化无功曲线则与系统负荷曲线具有较强的相似性，即负荷高峰时向

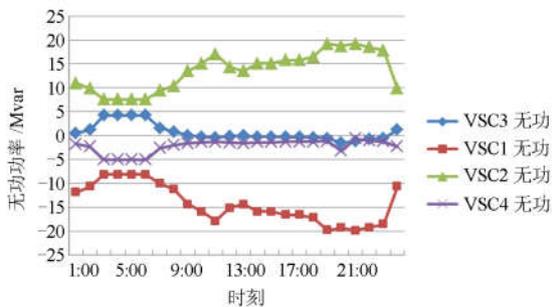


图 10 VSC 无功功率曲线

Fig. 10 Curve of reactive power of the VSC

交流系统多注入无功功率，而负荷低谷时向交流系统少注入无功功率，这增强了电网的电压控制能力，并降低了有功损耗。

同时无功功率注入既有感性无功也有容性无功，这是因为基于电压源的换流站既可以补偿无功也可以消纳无功，换流站的无功调节是双向的，这一点与交流电网中的电容器无功补偿具有显著区别。

4) 双馈风机无功支撑能力的影响

传统的优化模型中一般采用恒定功率因数控制方式，将风机无功出力视为定值，无法充分反映风机无功的支撑能力。本文采用线性化容量曲线表示 DFIG 的无功支撑能力，其优化结果如表 6 所示。

表 6 考虑双馈风机无功支撑与否的优化结果对比

Table 6 Comparison of network loss with/without capacity curve of DFIG models

类别	考虑风机无功	不考虑风机无功
网损/MW	261.40	263.78

从表 6 可以看出，在考虑双馈风机无功支撑的情况下，系统网损会比忽略其无功支撑的情形小。同时图 11 表明，在考虑双馈风机无功支撑能力时，无功补偿功率有所下降，特别是在负荷高峰期，双馈风机提供了有力的无功支撑。

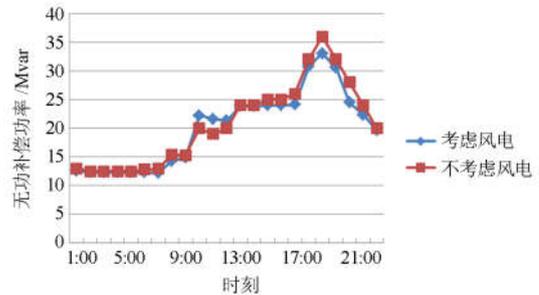


图 11 考虑风电无功支撑无功补偿功率比较

Fig. 11 Comparison for the reactive power provided by CB and SVC with/without DFIG reactive power

5 结论

针对含分布式能源的交直流系统动态无功优化这一复杂的非凸非线性混合整数规划问题，本文建立了计及 VSC 和 DFIG 的电网动态无功优化模型。该模型考虑交直流系统的潮流约束、直流变量的控制约束、离散控制变量动态调节次数约束及节点电压的安全约束，并将非凸的交流潮流方程近似转化为凸的二阶锥约束，同时将难以直接求解的双馈风机容量曲线线性化。算例分析验证了本文所建模型和算法的有效性。

参考文献

- [1] 张昕, 张勇, 钱伟杰, 等. 基于简化零空间内点法 VSC-HVDC 离散化最优潮流的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(18): 15-23.
ZHANG Xin, ZHANG Yong, QIAN Weijie, et al. Research on the optimal power flow of VSC-HVDC based on the simplified null space interior point method[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(18): 15-23.
- [2] HUANG D, SHU Y, RUAN J, et al. Ultra high voltage transmission in China: developments, current status and future prospects[J]. Proceedings of the IEEE, 2009, 97(3): 555-583.
- [3] 吴素农, 于金镒, 田庄, 等. 基于扩展节点法的交直流混合电网统一潮流算法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(14): 40-47.
WU Sunong, YU Jinyi, TIAN Zhuang, et al. A unified power flow algorithm for AC/DC hybrid networks using modified augmented nodal analysis[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(14): 40-47.
- [4] ZHANG Y, GOLE A M. Consideration of inertia for design of reactive power compensation devices for HVDC transmission systems[C] // 10th IET International Conference on AC and DC Power Transmission, December 4-5, 2012, Birmingham, UK: 1-6.
- [5] 肖湘宁, 李伟, 罗超, 等. 特高压直流孤岛运行特性与稳定控制研究综述[J]. 电工技术学报, 2017, 32(10): 1-11.
XIAO Xiangning, LI Wei, LUO Chao, et al. Survey on operational characteristics and stability control of ultra-HVDC transmission system in islanded model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(10): 1-11.
- [6] 郑超, 汤涌, 马世英, 等. 直流整流站动态无功特性解析及优化措施[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(28): 4886-4896.
ZHENG Chao, TANG Yong, MA Shiyong, et al. Study on the dynamic reactive power characteristic of HVDC rectifier stations and optimization measures[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(28): 4886-4896.
- [7] 王莹, 刘兵, 刘天斌, 等. 特高压直流闭锁后省间紧急功率支援的协调优化调度策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(11): 2695-2702.
WANG Ying, LIU Bing, LIU Tianbin, et al. Coordinated optimal dispatching of emergency power support among provinces after UHVDC transmission system block fault[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(11): 2695-2702.
- [8] 王家融, 艾欣, 王坤宇, 等. 基于增广雅可比矩阵的交直流解耦潮流新算法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(6): 1382-1389.
WANG Jiarong, AI Xin, WANG Kunyu, et al. A novel AC-DC decoupled power flow calculation method based on the augmented Jacobian matrix[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(6): 1382-1389.
- [9] 叶希, 鲁宗相, 乔颖, 等. 大规模风电机组连锁脱网事故机理初探[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(8): 11-17.
YE Xi, LU Zongxiang, QIAO Ying, et al. A primary analysis on mechanism of large scale cascading trip-off of wind turbine generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(8): 11-17.
- [10] YU J, YAN W, LI W, et al. Quadratic models of AC-DC power flow and optimal reactive power flow with HVDC and UPFC controls[J]. Electric Power Systems Research, 2008, 78(3): 302-310.
- [11] 颜伟, 张海兵, 田甜, 等. 交直流系统的动态无功优化[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(10): 43-46.
YAN Wei, ZHANG Haibing, TIAN Tian, et al. Dynamic reactive power optimization of AC/DC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(10): 43-46.
- [12] 邸弢, 李华强, 范锴. 基于奇异值分解和内点法的交直流系统无功优化[J]. 电工技术学报, 2009, 24(2): 158-163.
DI Tao, LI Huaqiang, FAN Pei. Reactive power optimization of AC/DC power system based on singular value decomposition and interior point method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(2): 158-163.
- [13] 李清, 刘明波, 杨柳青. 求解交直流互联电网多目标无功优化问题的 INNC 法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(7): 1150-1158.
LI Qing, LIU Mingbo, YANG Liuqing. INNC method applied to multi-objective reactive power optimization in AC/DC interconnected power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(7): 1150-1158.
- [14] 李清, 刘明波, 赵文猛. 考虑直流功率调节次数限制的交直流系统动态无功优化[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2016, 44(4): 55-62.
LI Qing, LIU Mingbo, ZHAO Wenmeng. Dynamic reactive power optimization considering DC power regulation limit in AC/DC power systems[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2016, 44(4): 55-62.
- [15] 杨堤, 程浩忠, 马则良, 等. 考虑静态和暂态电压稳定的交直流混联系统综合无功规划方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(11): 3078-3086.
YANG Di, CHENG Haozhong, MA Zeliang, et al.

- Integrated reactive power planning methodology considering static and transient voltage stability for AC-DC hybrid system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(11): 3078-3086.
- [16] 郑超, 周孝信, 李若梅, 等. VSC-HVDC 稳态特性与潮流算法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(6): 1-5.
ZHENG Chao, ZHOU Xiaoxin, LI Ruomei, et al. Study on the steady characteristic and algorithm of power flow for VSC-HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(6): 1-5.
- [17] FLOURENTZOU N, AGELIDIS V G, DEMETRIADES G D. VSC-based HVDC power transmission systems: an overview[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(3): 592-602.
- [18] 卫志农, 季聪, 孙国强, 等. 含 VSC-HVDC 的交直流系统内点法最优潮流计算[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(19): 89-95, 190.
WEI Zhinong, JI Cong, SUN Guoqiang, et al. Interior point optimal power flow of AC-DC system with VSC-HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(19): 89-95, 190.
- [19] BARADAR M, GHANDHARI M. A multi-option unified power flow approach for hybrid AC/DC grids incorporating multi-terminal VSC-HVDC[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 2376-2383.
- [20] CHAUDHARY S K, TEODORESCU R, RODRIGUEZ P, et al. Negative sequence current control in wind power plants with VSC-HVDC connection[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 3(3): 535-544.
- [21] MOAWWAD A, MOURSI M S E, XIAO W. A novel transient control strategy for VSC-HVDC connecting offshore wind power plant[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(4): 1056-1069.
- [22] LIU H, CHEN Z. Contribution of VSC-HVDC to frequency regulation of power systems with offshore wind generation[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2015, 30(3): 918-926.
- [23] BARADAR M, HESAMZADEH M R, GHANDHARI M. Second-order cone programming for optimal power flow in VSC-type AC-DC grids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 4282-4291.
- [24] DING T, LI C, YANG Y, et al. Second-order cone programming relaxation-based optimal power flow with hybrid VSC-HVDC transmission and active distribution networks[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2017, 11(15): 3665-3674.
- [25] 余秀月, 宋少群, 郭瑞鹏, 等. 含电压源换流器的交直流混联电网无功优化模型[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(19): 148-153.
YU Xiuyue, SONG Shaoqun, GUO Ruipeng, et al. Optimal reactive power flow model for AC/DC hybrid power grid with voltage source converters[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(19): 148-153.
- [26] 王守相, 陈思佳, 谢颂果. 考虑安全约束的交直流配电网储能与换流站协调经济调[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(11): 85-91.
WANG Shouxiang, CHEN Sijia, XIE Songguo. Security constrained coordinated economic dispatch of energy storage systems and converter stations for AC/DC distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(11): 85-91.
- [27] RUEDA-MEDINA A C, FRANCO J F, RIDER M J, et al. A mixed-integer linear programming approach for optimal type, size and allocation of distributed generation in radial distribution systems[J]. Electric Power Systems Research, 2013, 97(1): 133-143.

收稿日期: 2018-08-31; 修回日期: 2018-11-22

作者简介:

范士雄(1984—), 男, 高级工程师, 研究方向为交直流混联电网优化控制技术;

刘幸蔚(1991—), 女, 工程师, 研究方向为智能电网调度自动化和优化控制技术;

沈晓东(1975—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为智能电网分析与优化, 园区多能源综合系统优化, 现代能量管理系统的支撑平台软件技术。E-mail: shengxd@scu.edu.cn

(编辑 姜新丽)