

含 VSC-HVDC 的交直流系统可用输电能力计算

李国庆¹, 张健²

(1. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012; 2. 吉林省电力有限公司调度通信中心, 吉林 长春 130021)

摘要: 利用等值电压源方法对电压源换流器进行等效, 从而导出了适合于优化计算的电压源换流器型直流输电(VSC-HVDC)系统模型。该模型能够考虑换流器的各种控制方式及运行限制, 且可用于多端直流系统。建立了含有 VSC-HVDC 的交直流系统可用输电能力计算模型, 在模型中考虑了对换流器控制变量的多种优化方式, 并应用序列二次规划法对模型进行求解。通过对修改后的 EPRI-36 节点交直流系统进行仿真计算, 验证了所提出模型的实用性及算法的有效性。

关键词: 可用输电能力; 电压源换流器; 交直流系统; 序列二次规划法

Available transfer capability calculation for AC/DC systems with VSC-HVDC

LI Guo-qing¹, ZHANG Jian²

(1. School of Electrical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China; 2. Dispatch and Communication Center, Jinlin Electric Power Co., Ltd, Changchun 130021, China)

Abstract: The voltage source converter is equivalently represented by voltage source model, thus the model of voltage source converter-high voltage direct current (VSC-HVDC) system suitable for optimal power flow calculation is developed. The model considers any control mode and operating limits of the converter; moreover, it could be applied to multi-terminal VSC-HVDC. The mathematical model of ATC for AC/DC systems with VSC-HVDC is set up in this paper, in which various methods for optimizing control variables of converters are considered. Sequential quadratic programming method is applied to calculate the ATC model. The modified EPRI-36 bus AC/DC system is simulated and numerical results illustrate the utility and validity of the proposed model and method.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China(No.50977009).

Key words: available transfer capability; voltage source converter; AC/DC systems; sequential quadratic programming method

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)01-0046-07

0 引言

在电力市场环境下, 电力系统区域间可用输电能力不仅是衡量输电网传输能力的一个重要指标, 也可以为判断电网是否安全稳定运行提供依据, 而且还能够引导市场参与者进行电力交易、刺激商业竞争以充分利用现有资源。因此, 如何快速、准确地计算区域间可用输电能力是电力市场环境下输电系统运营中迫切需要解决的关键问题。

北美电力可靠性委员会(NERC)在20世纪90年代提出了可用输电能力(ATC)的概念, 定义ATC为在现有的输电合同基础上, 实际输电网络中剩余的、还可用于商业使用的传输容量^[1], 即

$$ATC=TTC-TRM-CBM-ETC \quad (1)$$

基金项目: 国家自然科学基金(50977009)

式中: *TTC* 是最大输电能力, 为在一可靠运行方式下互联输电网络上传输的最大功率量, 且同时满足一组指定的故障前、后系统条件; *TRM* 是输电可靠性裕度, 为必要的传输容量, 以确保互联输电网络在系统条件中一个合理范围内的不确定因素下是安全的; *CBM* 是容量效益裕度, 为负荷供应方保留的传输容量, 在满足发电可靠性要求的前提下, 以确保负荷从互联系统获得电力; *ETC* 是现存输电协议, 本质上包括给定条件下所有正常的输电潮流, 即基态潮流。

目前对ATC的研究和计算大多只限于纯交流系统, 研究方法概括而言可分为两类: 基于概率的求解方法和确定性的求解方法^[2]。所谓基于概率的求解方法就是利用概率理论来确定系统的输电能力, 考虑电力系统中的不确定因素的影响, 如设备故障概率、负荷的变化、发电机出力分配的波动等, 分析系统可能出现的运行状态, 计算各种可能状态出

现的概率和对应状态下的 ATC, 最后通过概率统计方法得到 ATC 的期望值, 其计算量较大^[3-4]。

确定性的求解方法主要有: 灵敏度分析法^[5]、连续潮流法^[6]和最优潮流法^[7]。灵敏度分析法适用于系统参数变化不大的情况下计算 ATC, 计算速度快, 但当系统参数有较大变化时所得结果误差很大^[8]。连续潮流法从基态潮流出发, 跟踪潮流的变化轨迹, 直到系统的临界最大潮流点。该方法能够考虑多种系统约束, 但未计及发电和负荷功率的优化分布, 结果偏于保守^[9]。最优潮流法通常描述一个大型的多约束非线性规划问题, 可以方便地计及各种约束和控制变量, 对约束条件有很强的处理能力, 非常适合 ATC 的计算。

随着现代电力电子技术的发展, 以可控关断型电力电子器件构成的电压源换流器 (VSC) 和脉宽调制 (PWM) 技术为基础的新一代高压直流输电技术 (VSC-HVDC), 得到了广泛的研究并已应用于实际工程^[10-12]。VSC-HVDC 克服了传统直流输电的不足, 扩展了直流输电的应用。目前, VSC-确实 HVDC 的最大容量能达到 1 000 MW, 直流电压提升至 ± 300 kV^[13]。

以往对 ATC 的计算仅限于纯交流系统, 而 VSC-HVDC 的引入, 使得现代电网的结构更加复杂, 交直流混合系统的运行方式更加灵活多变。针对 VSC-HVDC 的静态和动态特征, 如何采用新的模型和方法进行 ATC 计算是一个亟待解决的问题。本文建立了含 VSC-HVDC 的交直流混合系统 ATC 的计算模型, 模型中考虑了 VSC-HVDC 所采用的控制方式和换流器的容量限制, 并应用序列二次规划 (SQP) 法进行求解。

1 ATC 计算中的 VSC-HVDC 数学模型

VSC-HVDC 采用基于可控关断型电力电子器件以及脉宽调制 (PWM) 技术的电压源换流站进行直流输电, 且根据实际应用的不同, 各换流站可接成背靠背式或由直流电缆连接, 如图 1 所示。图中, V_{si} 为交流母线电压基波分量, V_{ci} 为 VSC 输出电压基波分量, θ_{si} 、 θ_{ci} 分别为 V_{si} 、 V_{ci} 的相角 ($i = m, n$)。

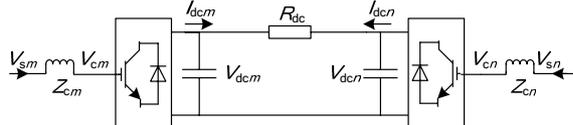


图 1 VSC-HVDC 的示意图
Fig.1 Schematic diagram of VSC-HVDC

假设各 VSC 通过电抗器与交流系统相连, X_i 为电抗器的基波电抗值, 当忽略谐波分量影响时, 有功

功率传输的大小和方向主要决定于 $\theta_{si} - \theta_{ci}$, 无功功率传输的大小和方向主要决定于 V_{ci} 。而在 VSC-HVDC 系统中, 电压源换流器采用脉宽调制控制, 其输出电压波形的基波幅值 V_{ci} 和相位角 θ_{ci} 由脉宽调制的调制比和移相角决定。因此, 通过调节调制比和移相角即可实现对有功功率和无功功率的控制^[14]。

为建立适合最优潮流计算的 VSC-HVDC 数学模型, 本文采用等值电压源模型^[15]来描述电压源换流器。该模型能够方便地计及直流系统的控制模式和运行限制, 适合于优化计算。为方便研究, 模型中不计换流器损耗且不考虑谐波分量的影响。图 2 为 VSC-HVDC 的等值电路, 其中 $Z_{ci} = R_{ci} + jX_{ci}$ 为耦合变压器的阻抗。

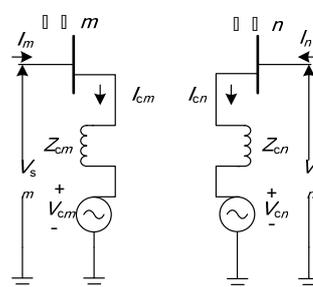


图 2 VSC-HVDC 的等值电路

Fig.2 Equivalent circuit of VSC-HVDC

基于等值电路, 可得交流系统通过节点 i ($i = m, n$) 注入直流系统的有功功率和无功功率分别为:

$$P_{si} = V_{si}^2 G_{ci} - V_{si} V_{ci} [G_{ci} \cos(\theta_{si} - \theta_{ci}) + B_{ci} \sin(\theta_{si} - \theta_{ci})] \quad (2)$$

$$Q_{si} = -V_{si}^2 B_{ci} - V_{si} V_{ci} [G_{ci} \sin(\theta_{si} - \theta_{ci}) - B_{ci} \cos(\theta_{si} - \theta_{ci})] \quad (3)$$

其中, $G_{ci} + jB_{ci} = 1/(R_{ci} + jX_{ci})$ 。

VSC 吸收的有功功率和无功功率分别为:

$$P_{ci} = -V_{ci}^2 G_{ci} + V_{si} V_{ci} [G_{ci} \cos(\theta_{si} - \theta_{ci}) - B_{ci} \sin(\theta_{si} - \theta_{ci})] \quad (4)$$

$$Q_{ci} = V_{ci}^2 B_{ci} - V_{si} V_{ci} [G_{ci} \sin(\theta_{si} - \theta_{ci}) + B_{ci} \cos(\theta_{si} - \theta_{ci})] \quad (5)$$

VSC 采用 PWM 控制, 设 M_{ci} 为其调制比, 取值区间为 $[0, 1]$, 则换流器交流侧电压 V_{ci} 和直流侧电压 V_{dci} 的关系^[16]为:

$$V_{ci} = M_{ci} V_{dci} / \sqrt{2} \quad (6)$$

根据直流支路参数及连接情况, 可得直流系统内部的网络方程为:

$$Y_{dc} V_{dc} = I_{dc} \quad (7)$$

式中: $I_{dc} = [-I_{dcm}, -I_{dcn}]^T$ 是直流节点注入电流列向量; $V_{dc} = [V_{dcm}, V_{dcn}]^T$ 为直流节点电压列向量; Y_{dc}

为直流网络的节点导纳阵。

VSC-HVDC 系统在正常稳态运行时,需要指定各 VSC 的控制方式。每个 VSC 可以各自控制其无功功率或交流母线电压,但直流网络的有功功率必须保持平衡,否则将引起直流电压的波动。为此,须由一个 VSC 来控制直流电压,其他 VSC 则可以在系统设定的范围内,任意整定有功功率,而控制直流电压的 VSC 可以调整其功率信号以保证有功平衡^[17]。

对于控制直流电压的 VSC,可以选择的控制方式为:

$$V_{dci} - V_{dc}^{spec} = 0 \quad Q_{si} - Q_{si}^{spec} = 0 \quad (8)$$

或

$$V_{dci} - V_{dc}^{spec} = 0 \quad V_{si} - V_{si}^{spec} = 0 \quad (9)$$

而对于其他 VSC,可以选择的控制方式为:

$$P_{si} - P_{si}^{spec} = 0 \quad Q_{si} - Q_{si}^{spec} = 0 \quad (10)$$

或

$$P_{si} - P_{si}^{spec} = 0 \quad V_{si} - V_{si}^{spec} = 0 \quad (11)$$

式中, V_{dc}^{spec} 、 P_{si}^{spec} 、 Q_{si}^{spec} 、 V_{si}^{spec} 为控制量设定值。

2 含 VSC-HVDC 的 ATC 求解模型

本文将 ATC 计算的目标函数定义为受电区域对外所有联络线的总输入功率与基态传输功率之差^[18],为简单计,忽略了 TRM、CBM,且不考虑网损的分摊,计算模型如下。

(1) 目标函数

$$\max \left\{ \sum_{i \in D, j \in E} [P_{ij}^{ac}(\mathbf{x}) + P_{ij}^{dc}(\mathbf{x})] - \sum_{i \in D, j \in E} (P_{ij}^{ac} + P_{ij}^{dc}) \right\} \quad (12)$$

式中, $P_{ij}^{ac}(\mathbf{x})$ 为外部区域 E 通过交流联络线对受电区 D 输入的有功功率, $P_{ij}^{dc}(\mathbf{x})$ 为外部区域 E 通过直流联络线对受电区 D 输入的有功功率; P_{ij}^{ac} 、 P_{ij}^{dc} 分别为 $P_{ij}^{ac}(\mathbf{x})$ 、 $P_{ij}^{dc}(\mathbf{x})$ 的基态值,其中 \mathbf{x} 是系统变量。

(2) 等式约束

(a) 潮流方程

当交流节点不与换流站相连时,该节点的潮流方程就是普通的潮流方程;当节点接有换流站时,原来的潮流方程就要计入交直流系统间的传输功率,表示为

$$\begin{cases} P_i - V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) - P_{si} = 0 \\ Q_i - V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) - Q_{si} = 0 \end{cases} \quad (13)$$

式中: P_i 、 Q_i 分别为交流节点 i 的注入有功和无功功率; P_{si} 、 Q_{si} 分别为直流系统从交流节点 i 吸收的

有功和无功功率; $G_{ij} + jB_{ij}$ 为交流系统节点导纳阵中的元素。

(b) 换流器有功功率平衡方程

因不计 VSC 损耗,根据能量守恒,有注入 VSC 的有功功率与输入直流网络的有功功率相等^[19]:

$$P_{ci} - V_{dci} I_{dci} = 0 \quad (14)$$

将式(4)代入,得有功功率平衡方程为:

$$-V_{ci}^2 G_{ci} + V_{si} V_{ci} [G_{ci} \cos(\theta_{si} - \theta_{ci}) - B_{ci} \sin(\theta_{si} - \theta_{ci})] - V_{dci} I_{dci} = 0 \quad (15)$$

(c) 换流站控制方程

考虑对 VSC 的控制变量所采取的优化方式的不同,这里对控制变量进行选择指定。当设置某一控制变量为指定值时,则引入相应的控制方程为:

$$X_{ci} - X_{ci}^{spec} = 0 \quad (16)$$

式中, X_{ci} 代表 V_{dci} 、 P_{si} 、 Q_{si} 和 V_{si} 中的某一个变量。但每个 VSC 最多可指定两个控制变量,而未指定的控制变量在运行可行域内进行寻优。

等式约束中,除上述方程外,还包括:交直流系统间传输功率方程式(2)和式(3)、换流器输出电压方程式(6)、以及直流网络方程式(7),在计算过程中须一并满足。

(3) 不等式约束

对于交流系统,需满足的约束有发电机组的出力约束、负荷容量约束、节点电压约束和线路容量约束,即为

$$\begin{cases} P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max} & i \in S_G \\ Q_{Gi}^{\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{\max} & i \in S_G \\ P_{Li}^{\min} \leq P_{Li} \leq P_{Li}^{\max} & i \in S_D \\ Q_{Li}^{\min} \leq Q_{Li} \leq Q_{Li}^{\max} & i \in S_D \\ V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} & i \in S_N \\ P_{ij}^{\min} \leq P_{ij} \leq P_{ij}^{\max} & i, j \in S_N \end{cases} \quad (17)$$

其中: S_G 是送电区的所有发电机节点集合; S_D 是受电区的所有负荷节点集合; S_N 为所有交流节点集合; 变量上角标 \min 、 \max 分别表示变量的下限和上限值。

对于直流系统,不等式约束首先应考虑直流电压约束、换流器交流侧电压约束、调制比约束、换流器的热容量约束及直流线路电流极限,即为

$$\begin{cases} V_{dci}^{\min} \leq V_{dci} \leq V_{dci}^{\max} \\ V_{ci}^{\min} \leq V_{ci} \leq V_{ci}^{\max} \\ M_i^{\min} \leq M_i \leq M_i^{\max} & i \in S_C \\ I_{ci} \leq I_{ci}^{\max} \\ I_{ij} \leq I_{ij}^{\max} \end{cases} \quad (18)$$

其中: S_C 是所有换流器节点的集合; I_{ci}^{\max} 是换流器的电流容量; I_{ci} 是通过换流器的电流, 计算公式:

$$I_{ci} = \frac{\sqrt{V_i^2 + V_{ci}^2 - 2V_i V_{ci} \cos(\theta_i - \theta_{ci})}}{\sqrt{R_{ci}^2 + X_{ci}^2}} \quad (19)$$

3 序列二次规划法

序列二次规划 (SQP) 法是将二次规划问题的求解方法, 推广应用于求解一般非线性规划问题的一种序列寻优方法。该方法具有超线性收敛性, 能够有效地处理不等式约束, 在非线性规划问题的求解中应用广泛^[20]。本文将采用序列二次规划法求解上述 ATC 模型。

该方法的基本思想是在迭代点处, 构造一个二次规划子问题, 近似原优化问题, 通过求解该二次规划子问题, 获得一个改进迭代点, 不断重复这个过程, 直到满足收敛条件^[21]。

对于一般非线性规划问题:

$$\begin{aligned} \min f(\mathbf{x}) \\ \text{s.t. } g_i(\mathbf{x}) = 0 \quad i = 1, \dots, m_e \\ g_i(\mathbf{x}) \geq 0 \quad i = m_e + 1, \dots, m \end{aligned} \quad (20)$$

其拉格朗日函数为:

$$L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}) = f(\mathbf{x}) + \sum \lambda_i \cdot g_i(\mathbf{x}) \quad (21)$$

式中, λ_i 为第 i 个约束的拉格朗日乘子。

在迭代点 \mathbf{x}_k 处, 对目标函数 $f(\mathbf{x})$ 作泰勒展开, 取二次截断, 并对 $g_i(\mathbf{x})$ 作泰勒展开, 取一次截断, 则可得到近似二次规划问题:

$$\begin{aligned} \min_{d \in R^n} \frac{1}{2} d^T \mathbf{H}_k d + \nabla f(\mathbf{x}_k)^T d \\ \text{s.t. } \nabla g_i(\mathbf{x}_k)^T d + g_i(\mathbf{x}_k) = 0, \quad i = 1, \dots, m_e \\ \nabla g_i(\mathbf{x}_k)^T d + g_i(\mathbf{x}_k) \leq 0, \quad i = m_e + 1, \dots, m \end{aligned} \quad (22)$$

式中: $d = \mathbf{x} - \mathbf{x}_k$, 为搜索方向; m_e 为等式约束个数; m 为约束总数。

采用有效集方法求解此二次规划子问题, 得搜索方向 d_k 进行迭代点的修正:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k + \alpha_k d_k \quad (23)$$

这里 α_k 为最优步长, 通过线性搜索确定, 且需建立罚函数以作为线性搜索的辅助函数。本文定义罚函数为:

$$\begin{aligned} \psi(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x}) + \sum_{i=1}^{m_e} r_i \cdot |g_i(\mathbf{x})| + \\ \sum_{i=m_e+1}^m r_i \cdot \max[0, -g_i(\mathbf{x})] \end{aligned} \quad (24)$$

式中 r_i 为惩罚参数, 按式 (25) 选取

$$r_i = \begin{cases} |\lambda_i^{(k)}| & k = 1 \\ \max[|\lambda_i^{(k)}|, \frac{1}{2}(r_i^{(k-1)} + |\lambda_i^{(k)}|)] & k \geq 2 \end{cases} \quad (25)$$

另外, 在迭代过程中, 海森矩阵 \mathbf{H}_k 采用拟牛顿法中的 BFGS 方法进行近似计算。

$$\mathbf{H}_{k+1} = \mathbf{H}_k + \frac{\mathbf{q}_k \mathbf{q}_k^T}{\mathbf{q}_k^T \mathbf{s}_k} - \frac{\mathbf{H}_k \mathbf{s}_k \mathbf{s}_k^T \mathbf{H}_k^T}{\mathbf{s}_k^T \mathbf{H}_k \mathbf{s}_k} \quad (26)$$

式中:

$$\mathbf{s}_k = \mathbf{x}_{k+1} - \mathbf{x}_k, \quad \mathbf{q}_k = \nabla_x L(\mathbf{x}_{k+1}, \boldsymbol{\lambda}) - \nabla_x L(\mathbf{x}_k, \boldsymbol{\lambda})$$

计算过程中必须满足 $\mathbf{q}_k^T \mathbf{s}_k > 0$ 以使 \mathbf{H}_{k+1} 正定, 但因线性搜索是对 $\psi(\mathbf{x})$ 进行的, 未必能满足要求, 为解决此问题, 令

$$\begin{aligned} \mathbf{q}_k = \theta \mathbf{w}_k + (1 - \theta) \mathbf{H}_k \mathbf{s}_k \\ \mathbf{w}_k = \nabla_x L(\mathbf{x}_{k+1}, \boldsymbol{\lambda}) - \nabla_x L(\mathbf{x}_k, \boldsymbol{\lambda}) \end{aligned} \quad (27)$$

其中

$$\theta = \begin{cases} 1, & \text{若 } \mathbf{w}_k^T \mathbf{s}_k \geq 0.2 \mathbf{s}_k^T \mathbf{H}_k \mathbf{s}_k \\ \frac{0.8 \mathbf{s}_k^T \mathbf{H}_k \mathbf{s}_k}{\mathbf{s}_k^T \mathbf{H}_k \mathbf{s}_k - \mathbf{w}_k^T \mathbf{s}_k}, & \text{其他} \end{cases} \quad (28)$$

由式 (27) 和式 (28), 有 $\mathbf{q}_k^T \mathbf{s}_k \geq 0.2 \mathbf{s}_k^T \mathbf{H}_k \mathbf{s}_k$, 当 \mathbf{H}_k 正定时, $\mathbf{q}_k^T \mathbf{s}_k \geq 0.2 \mathbf{s}_k^T \mathbf{H}_k \mathbf{s}_k > 0$, 从而保持了 \mathbf{H}_{k+1} 的正定性。

综上, 应用 SQP 法求解 ATC 计算步骤如下:

(1) 选定初始点 \mathbf{x}_0 , 初始化矩阵 \mathbf{B}_0 , 给定允许误差 ε , 令 $k = 0$ 。

(2) 求解二次规划问题式 (22), 得最优搜索方向 d_k 及相应的拉格朗日乘子 λ_k 。

(3) 利用式 (25) 求解惩罚参数 r_i , 代入罚函数式 (24) 作线性搜索得最优步长 α_k , 并用式 (23) 更新 \mathbf{x} 。

(4) 计算 $\mathbf{s}_k = \mathbf{x}_{k+1} - \mathbf{x}_k$, 若 $\|\mathbf{s}_k\| < \varepsilon$, 算法停止, 输出结果; 否则, 应用式 (26) 更新海森矩阵 \mathbf{H}_{k+1} , 令 $k = k + 1$, 转步骤 (2)。

4 算例分析

本文算例以 EPRI 36 节点系统为基础, 分别用两个 VSC-HVDC 来替换原有支路 25-26 及 33-34, 修改后的 EPRI 36 是一个包含两个双端 VSC-HVDC 的交直流系统。图 3 给出了修改后的系统支路连接及区域划分情况。该系统包括 8 台发电机, 42 条线路, 9 个负荷, 划分为 3 个区域。

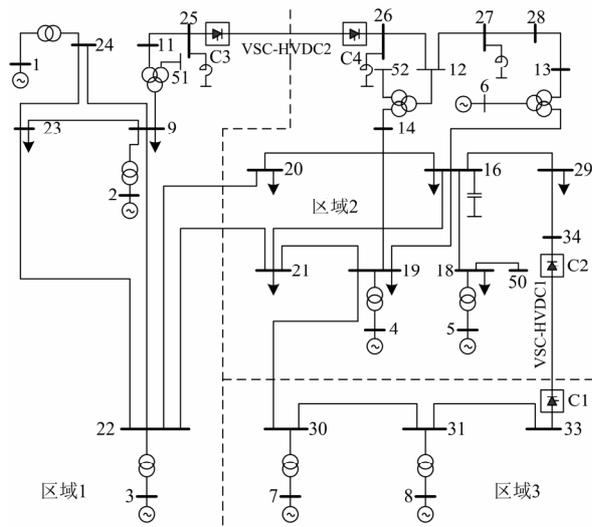


图3 修改后的 EPRI-36 节点系统

Fig.3 The modified EPRI-36 bus system

为验证模型的实用性,这里考虑了 VSC 控制变量的三种优化方案,分别计算区域 1 到区域 2 的可用输电能力。基态下,两直流系统中各 VSC 分别采用如下的控制策略: C1、C2 分别采用控制方式(8)和式(10), C3、C4 分别采用控制方式(9)和式(11),控制变量设定值分别见表 1 和表 2。

表 1 C1 和 C2 的控制变量设定值(标么值)

Tab.1 Control variables' setting values of C1 and C2 (pu)

VSC-HVDC 1	C1		C2		
	控制变量	V_{dc1}	Q_{s1}	P_{s2}	Q_{s2}
设定值	3	-0.2	-3	-0.3	

表 2 C3 和 C4 的控制变量设定值(标么值)

Tab.2 Control variables' setting values of C3 and C4 (pu)

VSC-HVDC 2	C3		C4		
	控制变量	V_{dc3}	V_{s3}	P_{s4}	V_{s4}
设定值	3	1	-4	1	

为进行交直流混合系统的分析计算,本文采用的基准值系统为:

$$\begin{cases} P_{dcB} = S_B \\ V_{dcB} = V_B \\ I_{dcB} = \sqrt{3}I_B \\ R_{dcB} = R_B \end{cases}$$

式中: P_{dcB} 、 S_B 分别为直流和交流系统的基准功率; V_{dcB} 、 I_{dcB} 、 R_{dcB} 和 V_B 、 I_B 、 Z_B 分别为换流器直流侧和交流侧的基准电压、基准电流及基准阻抗。图 3 中,各 VSC 交流侧额定电压为 100 kV,计算时选取 $P_{dcB}=S_B=100$ MVA、 $V_{dcB}=V_B=100$ kV,各部分元

件参数标么值为: $Z_{ci}=0.0001+j0.01$ pu ($i=1,2,3,4$), $R_{d1}=0.05$ pu、 $R_{d2}=0.03$ pu。各交流节点电压上、下限取 1.05 pu 和 0.95 pu,换流器交流侧节点电压上、下限取 1.04 pu 和 0.97 pu,调制比上、下限取 1 和 0.5。

(1) 考虑 VSC 的全部控制方式

保持各 VSC 在基态下的控制方式及控制变量设定值不变,直流电压 V_{dc2} 、 V_{dc4} 的上、下限取 3 pu 和 2.8 pu。经计算表明,若直流系统中各 VSC 的控制指令不变,则区域 1 到区域 2 还能进一步传输的最大功率为 101.33 MW,最优解处各变量值如表 3。

表 3 情况 1 中最优解处各 VSC 的变量值(标么值)

Tab.3 The variables' optimal values of converters in case 1

变量	VSC-HVDC 1		VSC-HVDC 2	
	C1	C2	C3	C4
P_s	3.053 5	-3	4.058 1	-4
Q_s	-0.2	-0.3	0.118 6	0.094 3
V_c	1.04	1.018 9	0.999 2	1.000 3
θ_c	-17.933 2	-36.871 4	-24.583 3	-26.129 5
V_{dc}	3	2.949 1	3	2.959 4
I_{dc}	1.017 6	-1.017 6	1.352 2	-1.352 2
M_c	0.980 5	0.977 2	0.942 1	0.956

(2) 不考虑 VSC 的控制方式

不指定各 VSC 的控制方式,控制变量在一定范围内取值。直流电压 V_{dc1} 、 V_{dc3} 的上、下限取 3.05 pu 和 2.85 pu, V_{dc2} 、 V_{dc4} 的上、下限取 3 pu 和 2.8 pu。计算得 ATC 为 152.46 MW,最优解处各变量值如表 4。各 VSC 可根据优化结果,选择合适的控制方式,以获得最大的传输功率。

表 4 情况 2 中最优解处各 VSC 的变量值(标么值)

Tab.4 The variables' optimal values of converters in case 2

变量	VSC-HVDC 1		VSC-HVDC 2	
	C1	C2	C3	C4
P_s	3.26	-3.200 9	4.569 6	-4.498 1
Q_s	0.021 9	-0.88	-1.034 8	-0.617 1
V_c	1.04	1.04	1.039 8	1.037 2
θ_c	-18.884 3	-37.821 1	-23.720 5	-26.177 1
V_{dc}	3.05	2.996 6	3.045	3
I_{dc}	1.068 5	-1.068 5	1.5	-1.5
M_c	0.964 4	0.981 6	0.965 9	0.977 9

(3) 只考虑 VSC 的部分控制方式

各 VSC 采用的控制方式和算例 1 相同,为得到 C2 和 C4 的有功功率最优设定值,先不指定二者的有功功率,其他指定的控制变量均按算例 1 取值,

最后由优化结果确定两 VSC 的有功功率设定值。直流电压 V_{dc2} 、 V_{dc4} 的上、下限取 3 pu 和 2.8 pu。经优化计算, 求得 ATC 为 145.39 MW, C2、C4 的有功功率最优值分别为 -3.199 pu 和 -4.430 5 pu, 如表 5 所示。

表 5 情况 3 中最优解处各 VSC 的变量值 (标么值)

Tab.5 The variables' optimal values of converters in case 3

变量	pu			
	VSC-HVDC 1		VSC-HVDC 2	
	C1	C2	C3	C4
P_s	3.26	-3.199	4.502	-4.430 5
Q_s	-0.2	-0.3	0.043 5	0.279 2
V_c	1.04	1.025 5	1.000 1	0.998 6
θ_c	-19.184 0	-37.209 1	-24.210 5	-25.732 5
V_{dc}	3	2.945 7	3	2.955
I_{dc}	1.086 3	-1.086 3	1.5	-1.5
M_c	0.980 5	0.984 7	0.942 9	0.955 9

综上所述, 可根据直流系统的实际运行状况, 制定 VSC 变量的多种优化方案, 从而得到不同情况下 ATC 及 VSC 变量的信息, 为系统调度及运行人员提供参考。

5 结论

本文提出了包含 VSC-HVDC 的交直流系统的可用输电能力计算方法。利用等值电压源方法, 对电压源换流器进行了等效, 进而得到 VSC-HVDC 的数学模型。采用最优潮流模型, 在模型中可以对 VSC 变量制定多种优化方案, 从而能得到相应情况下 ATC 及 VSC 变量的信息。算法上采用序列二次规划法, 以修改后的 EPRI-36 节点系统为例, 分三种情况进行了计算, 仿真结果验证了本文所采用模型的合理性和通用性, 以及算法的有效性。

参考文献

- [1] NERC North American Electric Reliability Council. Available transfer capability definitions and determination: a reference document prepared by TTC task force[R]. New Jersey: 1996.
- [2] 李国庆, 王成山, 余贻鑫. 大型互联电力系统区域间功率交换能力研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(4): 20-25.
LI Guo-qing, WANG Cheng-shan, YU Yi-xin. A survey on transmission transfer capability of interconnected electric power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 24(4): 20-25.
- [3] 李国庆, 李雪峰, 沈杰, 等. 牛顿法和内点罚函数法相结合的概率可用功率交换能力计算[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 17-22.
LI Guo-qing, LI Xue-feng, SHEN Jie, et al. A probability ATC computation by a combination of Newton's method with SUMT interior point method[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(8): 17-22.
- [4] Rodrigues A B, Da Silva M G. Probabilistic assessment of available transfer capability based on Monte Carlo method with sequential simulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(1): 484-492.
- [5] Ghawghawe N D, Thakre K L. Application of power flow sensitivity analysis and PTFD for determination of ATC[C]. //IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES-2006). New Delhi: 2006.
- [6] Ejebe G C, Tonj J, Waight J G, et al. Available transfer capability calculations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1998, 13(4): 1521-1527.
- [7] Shu C, Jeyasurya B. Power system transfer capability studies using constrained optimization technique[C]. //IEEE Power Engineering Society General Meeting. Toronto(Canada): 2003: 885-889.
- [8] 邱永生, 刘焕志, 李扬. 区域间可用输电能力计算的灵敏度分析法[J]. 继电器, 2005, 33(2): 21-25.
QIU Yong-sheng, LIU Huan-zhi, LI Yang. ATC calculation among different regions based on sensitivity analysis[J]. Relay, 2005, 33(2): 21-25.
- [9] 刘皓明, 倪以信, 吴军基, 等. 计算电网可用输电能力计算的方法述评[J]. 继电器, 2003, 31(10): 45-50.
LIU Hao-ming, NI Yi-xin, WU Jun-ji, et al. Review of available transfer capability calculation in electricity market[J]. Relay, 2003, 31(10): 45-50.
- [10] Bahrman M P, Johansson J G, Nilsson B A. Voltage source converter transmission technologies: the right fit for the application[C]. //IEEE Power Engineering Society General Meeting. Toronto(Canada): 2003: 1840-1847.
- [11] 唐健, 刘天琪, 李兴源. 新型直流输电数学模型和控制方式研究综述[J]. 继电器, 2006, 34(14): 75-80.
TANG Jian, LIU Tian-qi, LI Xing-yuan. Current development on the mathematic model and control of VSC-HVDC[J]. Relay, 2006, 34(14): 75-80.
- [12] 袁旭峰, 程时杰. 多端直流输电技术及其发展[J]. 继电器, 2006, 34(19): 61-67.
YUAN Xu-feng, CHENG Shi-jie. Multi-terminal HVDC transmission technology and its development[J]. Relay, 2006, 34(19): 61-67.
- [13] Jacobson B, Jiang H Y, Rey P, et al. HVDC with voltage source converters and extruded cables for up to ± 300 kV and 1000MW[C]. //CIGRE 2006. Paris(France): 2006.
- [14] Asplund G. Application of HVDC light to power

enhancement[C]. //Power Engineering Society Winter Meeting, IEEE. 2000 (4) : 23-27.

[15] ZHANG Xiao-ping. Multiterminal voltage-sourced converter-based HVDC models for power flow analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19 (4) : 1877-1884.

[16] 郑超, 汤涌, 马世英, 等. 基于等效仿真模型的 VSC-HVDC 次同步振荡阻尼特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27 (31) : 33-39.
ZHENG Chao, TANG Yong, MA Shi-ying, et al. Subsynchronous oscillation damping characteristic analysis for VSC-HVDC based on its equivalent simulation model[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27 (31) : 33-39.

[17] Asplund G, Eriksson K, Svensson K. DC transmission based on voltage source converter[C]. //CIGRE SC14 Colloquium. South Africa: 1997.

[18] 汪峰, 白晓民. 基于最优潮流方法的传输容量计算研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22 (11) : 35-40.
WANG Feng, BAI Xiao-min. OPF based transfer capability calculation[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22 (11) : 35-40.

[19] Watson N R, Arrillaga J. Incorporation of VSC transmission in power flow simulation[C]. //The 8th International Power Engineering Conference. Meritus Mandarin(Singapore): 2007.

[20] Lu C N, Chen S S, Ong C M. The incorporation of HVDC equations in optimal power flow methods using sequential quadratic programming techniques[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1988, 19 (4) : 1877-1884.

[21] 毕兆东, 王建全, 韩祯祥. 逐步二次规划法在约束潮流中的运用[J]. 电网技术, 2003, 27 (2) : 31-33.
BI Zhao-dong, WANG Jian-quan, HAN Zhen-xiang. Constrained load flow calculation by sequential quadratic programming method[J]. Power System Technology, 2003, 27 (2) : 31-33.

收稿日期: 2010-01-12; 修回日期: 2010-03-02

作者简介:

李国庆 (1963-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统的安全性和稳定性分析, 控制与决策, 配电系统自动化;

张健 (1985-), 男, 硕士, 研究方向为电力系统的安全性和稳定性分析. E-mail: jianzi2008@163.com

(上接第 45 页 continued from page 45)

[4] Smed T, Andersson G, Sheble G B, et al. A new approach to AC/DC power flow[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1991, 6 (3): 1238-1244.

[5] IWAMOTO S, TAMURA Y. A load flow calculation method for ill-conditioned power systems[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1981, 100 (4): 1736-1743.

[6] 刘崇茹, 张伯明. 交直流混合系统潮流算法改进及其鲁棒性分析[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29 (19): 57-62.
LIU Chong-ru, ZHANG Bo-ming. Revised algorithm for AC/DC power flow and its robustness analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29 (19): 57-62.

[7] 徐政. 交流等值法交直流电力系统潮流计算[J]. 中国电机工程学报, 1994, 14 (3): 1-6.
XU Zheng. The AC equivalent algorithm for AC/DC power system power flow calculation[J]. Proceedings of the CSEE, 1994, 14 (3): 1-6.

[8] 刘崇茹. 交直流混合系统状态估计算法研究与分析[J]. 继电器, 2008, 36 (6): 14-19.
LIU Chong-ru. Research and analysis on algorithm of state estimation of AC/DC systems[J]. Relay, 2008, 36 (6): 14-19.

[9] 王秀婕, 李华强, 李波, 等. 基于连续潮流法及内点法的交直流负荷裕度算法[J]. 继电器, 2006, 34 (22): 22-26.
WANG Xiu-jie, LI Hua-qiang, LI Bo, et al. An algorithm for voltage stability assessment of AC/DC power system based on continuation method and interior point theory[J]. Relay, 2006, 34 (22): 22-26.

[10] 王宪荣, 柳焯, 张伯明. 交直流系统潮流新算法[J]. 中国电机工程学报, 1991, 11: 99-106.
WANG Xian-rong, LIU Zhuo, ZHANG Bo-ming. A new AC/DC load flow approach[J]. Proceedings of the CSEE, 1991, 11: 99-106.

[11] 赵曦君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.

[12] 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.

收稿日期: 2010-08-02; 修回日期: 2010-11-24

作者简介:

谭涛亮 (1980-), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统运行与稳定; E-mail: 30940480@qq.com

张尧 (1948-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统运行与稳定、电力市场、电网规划。