

含VSC-HVDC的交直流系统无功优化

已有的交直流系统无功优化模型和算法对含电压源换流器的高压直流输电 (Voltage Source Converter Based High Voltage Direct Current, VSC-HVDC) 不再适用。针对VSC-HVDC的特点研究了含VSC-HVDC的交直流系统无功优化模型, 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, 提出一种变换算法, 可将原问题转化为混合二次规划问题予以求解。最后仿真算例验证了所提方法的有效性和高效性。

何晓洋 李正文 李 铁/国网辽宁省电力有限公司 陈艳波/华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室 张 籍/国网湖北省电力公司经济技术研究院



何晓洋/高级工程师

关键词/Keywords

电压源换流器·
交直流系统·
无功优化·
高压直流输电·

无功优化对改善电能质量以及提高电力系统运行的安全性、可靠性和经济性具有重要意义^[1]。在控制方法上, 无功优化通过调节系统中无功电源(同步发电机和无功补偿设备)的出力及变压器的分接头位置予以实现。在数学上, 无功优化一般要求求解一个同时含有等式约束和不等式约束、连续变量和离散变量共存的非线性非凸优化问题。国内外对无功优化进行了大量研究, 所提出的无功优化算法可分为两大类: 一类是数学规划方法, 主要包括线性规划法、二次规划法、非线性规划法和内点法; 另一类是智能优化算法, 主要包括遗传算法、模拟退火算法、粒子群优化算法和禁忌搜索算法等。与基于智能优化法的无功优化算法相比, 基于数学规划的

无功优化算法计算速度快, 但处理离散变量较为困难, 且全局寻优能力不强; 而基于智能优化法的无功优化算法在处理大规模问题时计算效率较低, 收敛缓慢。为此, 研究人员又提出了智能优化法和数学规划相结合的无功优化算法^[2]。在研究对象方面, 除了交流系统的无功优化外, 学者们还研究了交直流系统的无功优化问题及算法^[3]。上述所有工作不断推动着无功优化的实用化, 但在全局寻优能力、计算效率方面仍需进一步改进。

近年来, 含电压源换流器的高压直流输电^[4] (Voltage Source Converter Based High Voltage Direct Current, VSC-HVDC) 成为研究热点, 并得到了一定的工程应用。VSC-HVDC的元件特性、控制方法和数学模型与传统的基于相控换流器的高压直流输电存在较大差异, 因此已有的交直流系统无功优化模型与含VSC-HVDC的交直流系统无功优化模型存在较大差异, 已有算法无法直接使用。

本文在文献[5, 6]提出VSC-HVDC潮流方程的基础上, 研究了含VSC-HVDC的交直流系统无功优化模型, 此模型在数学上仍为非线性非凸优化问题; 针对此模型的特点, 论文提出了一种变换算法, 可将原有的非线性非凸优化问题转化为混合二次规划问题, 从而可大大增强全局寻优能力, 并显著提高计算效率。多个算例的仿真结果验证了本文所提方法的有效性和高效性。

国家高技术研究发展计划资助项目(2012AA0-50208), 国家自然科学基金资助项目(51407069), 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2014QN02)。

含VSC-HVDC的无功优化模型

1. 稳定功率特性及控制方式

含VSC-HVDC的交直流系统示意图如图1所示, 系统包括三个部分: 交流系统、换流站及直流网络。

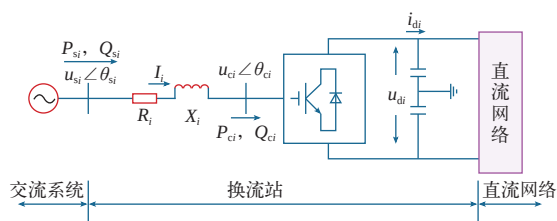


图1 含VSC-HVDC的交直流系统示意图

在图1中, 交流系统的端口电压为 $u_{si} = u_{si} \angle \theta_{si}$; 换流站的输入电压为 $u_{ci} = u_{ci} \angle \theta_{ci}$; 换流变压器的等效阻抗为 $R_i + jX_i$; 交流系统注入换流站的功率为 $P_{si} + jQ_{si}$, 注入换流桥的功率为 $P_{ci} + jQ_{ci}$ 。可推导得到VSC-HVDC的潮流方程为

$$P_{si} = -u_{si}u_{ci}Y_i \cos(\delta_i + \alpha_i) + u_{si}^2 Y_i \cos \alpha_i \quad (1)$$

$$Q_{si} = -u_{si}u_{ci}Y_i \sin(\delta_i + \alpha_i) + u_{si}^2 Y_i \sin \alpha_i \quad (2)$$

$$P_{ci} = u_{si}u_{ci}Y_i \cos(\delta_i - \alpha_i) - u_{ci}^2 Y_i \cos \alpha_i \quad (3)$$

$$Q_{ci} = -u_{si}u_{ci}Y_i \sin(\delta_i - \alpha_i) - u_{ci}^2 Y_i \sin \alpha_i \quad (4)$$

$$P_{di} = u_{di}i_{di} = u_{si}u_{ci}Y_i \cos(\delta_i - \alpha_i) - u_{ci}^2 Y_i \cos \alpha_i \quad (5)$$

$$i_{di} = \pm \sum_{j=1}^n g_{dij} u_{dj} \quad (6)$$

式中, 下标 i 为第 i 个VSC; $\delta_i = \theta_{si} - \theta_{ci}$; $Y_i = 1/\sqrt{R_i^2 + X_i^2}$; $\alpha_i = \arctan(X_i/R_i)$; μ_d 为直流电压利用率, $0 \leq \mu_d \leq 1$, $u_{ci} = \mu_d M_i u_{di} / \sqrt{2}$; g_{dij} 为消去联节点后直流网络节点电导矩阵中的元素; 式(6)中的正负号分别对应于整流器和逆变器。

由上述公式可得换流站的有功损耗为

$$\begin{aligned} \Delta P_{ac,i} &= P_{si} - P_{ci} \\ &= 2u_{si}u_{ci}Y_i \sin \delta_i \sin \alpha_i + (u_{si}^2 + u_{ci}^2)Y_i \cos \alpha_i \end{aligned} \quad (7)$$

两端直流网络的有功损耗为

$$\Delta P_{dc,i} = i_{di}^2 R_{di} \quad (8)$$

式中, R_{di} 为直流网络的等效电阻, 对于背靠背两端直流网络, 可认为 $R_{di} = 0$ 。

在实际应用中, VSC-HVDC的控制目标一般

为以下变量: 交流系统端口电压 u_s 、直流网络电压 u_d 、注入换流站的有功功率 P_s 和无功功率 Q_s 。潮流计算时, 针对每个VSC需在以上四个控制变量中选择两个, 常用的四种组合为: ①定 P_s 、定 Q_s 控制。②定 Q_s 、定 u_d 控制。③定 P_s 、定 u_s 控制。④定 u_s 、定 u_d 控制。对于常见的两端VSC-HVDC来说, 常见的控制方式组合为②①、①④、②③和③④; 对多端VSC-HVDC来说, 其控制方式组合数目更多。

2. 无功优化模型

当无功优化的目标取网损最小时, 含VSC-HVDC的交直流系统无功优化模型可表示为

$$\begin{aligned} \text{Min. } f_Q &= \sum_{k \in N_B} P_{k, \text{loss}} + \sum_{i \in N_{VSC}} P_{i, \text{loss}} \\ &= \sum_{k \in N_B} g_k (u_i^2 + u_j^2 - 2u_i u_j \cos \theta_{ij}) + \\ &\quad \sum_{i \in N_{VSC}} (2u_{si} u_{ci} Y_i \sin \delta_i \sin \alpha_i + (u_{si}^2 + u_{ci}^2) Y_i \cos \alpha_i + i_{di}^2 R_{di}) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \text{s. t. } 0 &= P_{Gi} - P_{Di} - u_i \sum_{j \in N_i} u_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ &\quad i \in N_A, i \neq s \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} 0 &= Q_{Gi} - Q_{Di} - u_i \sum_{j \in N_i} u_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \\ &\quad i \in N_{PQ} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} 0 &= P_{si} + u_{si} u_{ci} Y_i \cos(\delta_i + \alpha_i) - u_{si}^2 Y_i \cos \alpha_i \\ &\quad i \in N_{VSC} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} 0 &= Q_{si} + u_{si} u_{ci} Y_i \sin(\delta_i + \alpha_i) - u_{si}^2 Y_i \sin \alpha_i \\ &\quad i \in N_{VSC} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} 0 &= u_{di} i_{di} - u_{si} u_{ci} Y_i \cos(\delta_i - \alpha_i) + u_{ci}^2 Y_i \cos \alpha_i \\ &\quad i \in N_{VSC} \end{aligned} \quad (14)$$

$$0 = i_{di} m \sum_{j=1}^n g_{dij} u_{dj} \quad (15)$$

$$u_{ci} = \mu_d M_i u_{di} / \sqrt{2} \quad (16)$$

$$u_{i, \min} \leq u_i \leq u_{i, \max} \quad i \in N_A \quad (17)$$

$$Q_{i, \min} \leq Q_i \leq Q_{i, \max} \quad i \in N_G \cup N_C \quad (18)$$

$$T_{k, \min} \leq T_k \leq T_{k, \max} \quad k \in N_T \quad (19)$$

式中, f_Q 为系统的总网损; $P_{k, \text{loss}}$ 为支路 k 的网损; $P_{i, \text{loss}}$ 为第 i 个VSC的网损; g_k 为支路 k 的电导; u_i 和 u_j 分别为该支路两端的电压幅值; θ_{ij} 为两端的相角度差; P_{Gi} 和 P_{Di} 分别为节点 i 的有功发电功率和负荷功率; Q_{Gi} 和 Q_{Di} 分别为节点 i 的无功发电功率和负荷功

率; N_A 、 N_{PQ} 、 N_{VSC} 、 N_G 、 N_C 、 N_T 和 N_B 分别为所有节点集合、PQ节点集合、VSC节点集合、发电机节点集合、补偿电容器节点集合、变压器支路集合及所有支路集合; N_i 为与节点 i 相连的所有节点的集合(包括自身); s 为平衡节点; G_{ij} 和 B_{ij} 分别为节点导纳矩阵中第 i 行第 j 列的实部和虚部; $u_{i,\min}$ 和 $u_{i,\max}$ 分别为节点 i 电压的下限和上限; $Q_i = Q_{Gi} - Q_{Di}$ 为节点 i 的注入无功功率, $Q_{i,\min}$ 和 $Q_{i,\max}$ 分别为其下限和上限; T_k 为变压器支路 k 的电压比, $T_{k,\min}$ 和 $T_{k,\max}$ 分别为 T_k 的下限和上限。

式(9)~式(19)即为含VSC-HVDC的无功优化模型,此模型的解对VSC-HVDC控制参数的整定具有指导意义,从而优化系统的运行方式。

模型的求解

1. 解决思路

从数学上看,式(9)~式(19)是一个典型的含有等式约束和不等式约束、连续变量和离散变量共存的非线性非凸优化问题,可用引言中所述的方法(比如内点法)进行求解,但这些方法难以兼顾全局寻优能力和计算效率。

显然,产生以上问题的根本原因在于潮流方程的非线性。若能采用某种变换,将式(9)~式(19)中的非线性潮流方程变为凸函数形式,并将目标函数变为变量的凸函数形式,则有望提高全局寻优能力,并显著提高工作效率。基于以上分析,本文提出一种混合二次规划(Mixed Integer Quadratic Programming, MIQP)形式的模型来代替式(9)~式(19)。

2. MIQP的建模与求解

引入如下形式的辅助状态变量

$$y = \{U_i, K_{ij}, L_{ij}\} \quad (20)$$

式中, $y \in R^{N+2b}$ 为辅助状态变量;对于普通支路两端节点, $U_i = u_i^2$, $U_j = u_j^2$;对于普通支路, $K_{ij} = u_i u_j \cos \theta_{ij}$, $L_{ij} = u_i u_j \sin \theta_{ij}$;对于换流变压器两端节点, $U_{si} = u_{si}^2$, $U_{ci} = u_{ci}^2$;对于换流变压器支路和直流支路, $K_{ij} = u_{si} u_{di} \cos \delta_i$, $L_{ij} = u_{si} u_{di} \sin \delta_i$, $U_{di} = u_{di}^2$ 。

基于以上辅助状态变量,式(9)~式(19)可转化为如下模型

$$\begin{aligned} \text{Min. } f_Q &= \sum_{k \in N_B} P_{k,\text{loss}} + \sum_{i \in N_{VSC}} P_{i,\text{loss}} \\ &= \sum_{k \in N_B} g_k (U_i + U_j - 2K_{ij}) + \\ &\quad \sum_{i \in N_{VSC}} \left(\sqrt{2} \mu_d M_i Y_i \sin \alpha_i L_{ij} + (U_{si} + \frac{\mu_d^2 M_i^2 U_{di}}{2}) Y_i \cos \alpha_i + i_{di}^2 R_{di} \right) \end{aligned} \quad (21)$$

$$\text{s.t. } 0 = P_{Gi} - P_{Di} - \sum_{j \in N_i} (G_{ij} K_{ij} + B_{ij} L_{ij}) \quad i \in N_A, i \neq s \quad (22)$$

$$0 = Q_{Gi} - Q_{Di} - \sum_{j \in N_i} (G_{ij} L_{ij} - B_{ij} K_{ij}) \quad i \in N_{PQ} \quad (23)$$

$$0 = P_{si} + \frac{1}{\sqrt{2}} \mu_d M_i Y_i (K_{ij} \cos \alpha_i - L_{ij} \sin \alpha_i) - U_{si} Y_i \cos \alpha_i \quad i \in N_{VSC} \quad (24)$$

$$0 = Q_{si} + \frac{1}{\sqrt{2}} \mu_d M_i Y_i (L_{ij} \cos \alpha_i + K_{ij} \sin \alpha_i) - U_{si} Y_i \sin \alpha_i \quad i \in N_{VSC} \quad (25)$$

$$0 = u_{di} i_{di} - \frac{1}{\sqrt{2}} \mu_d M_i Y_i (K_{ij} \cos \alpha_i + L_{ij} \sin \alpha_i) + \frac{1}{2} \mu_d^2 M_i^2 Y_i U_{di} Y_i \cos \alpha_i \quad i \in N_{VSC} \quad (26)$$

$$0 = i_{di} m \sum_{j=1}^n g_{dij} u_{dj} \quad (27)$$

$$U_{i,\min} \leq U_i \leq U_{i,\max} \quad i \in N_A \quad (28)$$

$$Q_{i,\min} \leq Q_i \leq Q_{i,\max} \quad i \in N_G \cup N_C \quad (29)$$

$$T_{k,\min} \leq T_k \leq T_{k,\max} \quad k \in N_T \quad (30)$$

式中, $U_{i,\min}$ 和 $U_{i,\max}$ 分别为 U_i 的下限和上限。

从数学上看,式(21)~式(30)中的目标函数和约束条件均是辅助状态变量和控制变量的二次函数或线性函数,且连续变量和离散变量(变压器电压比)共存,因而是一个带二次约束的MIQP问题。此问题从数学上可保证得到全局最优解,并可利用优秀的商用软件CPLEX予以高效求解,从而解决了传统算法对非线性非凸优化式(9)~式(19)求解时的问题,因而具有重要的理论意义和工程应用价值。

算例分析

首先对IEEE节点系统进行修改,加入VSC-HVDC支路,然后对含VSC-HVDC的无功优化式(9)~式(19)及式(21)~式(30)进行对比分

析，两个模型分别采用内点法和CPLEX进行求解。

1. IEEE-14节点系统测试

将IEEE-14节点系统中的支路13-14修改为VSC-HVDC支路，如图2所示。直流系统参数（标么值）如表1所示。设系统的容量基值为100 MV·A；各母线电压（标么值）的波动范围为[0.9, 1.1]；变压器电压比的变化范围为[0.9, 1.1]；相邻抽头的电压比差为0.012 5；母线9处电容器组的补偿容量为[0, 0.5]，步长为0.01；VSC-HVDC的有功调节范围为[-1.5, 1.5]，无功调节范围为[-0.8, 0.8]；母线13和母线14处VSC的控制方式分别为①、④。

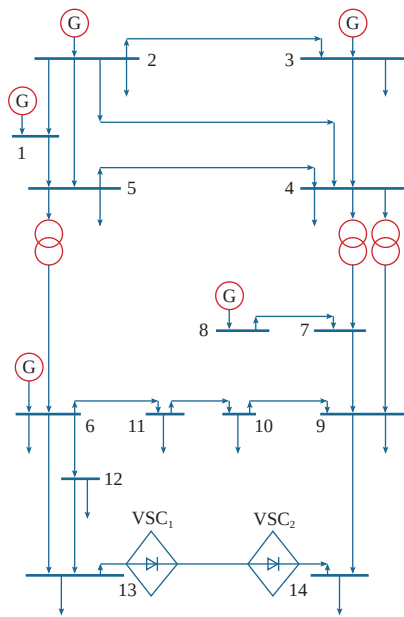


图2 修改后的IEEE-14节点交直流混合系统示意图

表1 直流系统参数

Bus NO.	R	X_L	P_s	Q_s	u_d
13	0.005	0.020	-0.042 5	0.008 2	2.000
14	0.005	0.020	-0.054 8	-0.013 3	2.000

分别采用式(9)~式(19)及式(21)~式(30)进行无功优化。优化前各机组的无功出力（即基本潮流计算结果）、以上两种模型优化后各机组的无功出力和无功补偿设备的出力（标么值）分别如表2所示。由表2可见，当采用式(9)~式(19)时，优化后网损减少了52%；而当采用式(21)~式(30)时，优化后

网损则减少了69%。其原因在于CPLEX得到了式(21)~式(30)的全局最优解，而基于内点法求解式(9)~式(19)时则陷入了局部最优解，因而基于CPLEX得到式(21)~式(30)的解优于基于内点法式(9)~式(19)的解，从而证明了本文所提算法的有效性。

表2 IEEE-14节点系统算例结果对比

控制变量 或网损	优化前	式(9)~ 式(19)优化结果	式(21)~ 式(30)优化结果
Q_{G1}	-0.166	-0.153	-0.159
Q_{G2}	0.436	0.417	0.415
Q_{G3}	0.251	0.202	0.213
Q_{G6}	0.127	0.109	0.123
Q_{G8}	0.176	0.219	0.197
Q_{C9}	0	0.263	0.287
网损	0.134	0.064	0.042

注： Q_{Gn} 代表是位于母线n处发电机的无功出力； Q_{Cn} 代表是位于母线n处电容器组的无功出力。

从计算效率上看，当采用内点法求解式(9)~式(19)时，经过8次收敛，计算耗时为20 ms；而当采用CPLEX求解式(21)~式(30)时，计算耗时仅为11 ms，从而验证了本文所提方法的高效性。

表3给出了无功优化前后VSC-HVDC的控制变量和状态变量值（标么值），其中无功优化采用式(21)~式(30)。

表3 VSC-HVDC控制变量和状态变量

控制变量或状态变量	VSC ₁		VSC ₂	
	优化前	优化后	优化前	优化后
u_d	2.002	2.002	2.000	2.000
i_d	0.018	0.017	-0.012	-0.011
δ	0.331	0.328	-0.182	-0.201
M	0.851	0.862	0.812	0.807
P_s	-0.807	0.041	-0.018	-0.018
Q_s	0.007	0.007	0.010	0.038

进一步的测试表明，当VSC采用不同的控制方式时，无功优化得到的网损结果也不同。因此，当进行含VSC-HVDC无功优化计算时，还应考虑不同的控制方式组合对无功优化结果的影响。

2. 其他IEEE节点系统测试

进一步对其他的IEEE节点系统进行修改并测

试,修改后的数据如表4所示。其中,节点后的后缀t和m分别代表两端和多端VSC-HVDC; k代表多馈入VSC-HVDC; n_c 和 n_b 分别代表直流VSC节点个数和直流支路个数; N_c 和 N_b 分别代表直流VSC节点编号和直流支路编号。

表4 修改后的IEEE其他节点系统中直流分布情况

算例	n_c	n_b	N_c	N_b	控制方式
IEEE-30t	2	1	9, 10	9-10	①④
IEEE-39t	2	1	17, 18	17-18	④②
IEEE-39k	4	2	4, 14, 16, 24	4-14, 16-24	②③, ①④
IEEE-57t	2	1	41, 56	41-56	③④
IEEE-57m	3	2	41, 56, 57	41-56, 56-57	①④, ②①
IEEE-118t	2	1	20, 30	20-30	③④
IEEE-118m	4	2	20, 30, 79, 81	20-30, 79-81	③④, ②①

针对以上修改后的IEEE节点系统,分别采用式(9)~式(19)及式(21)~式(30)进行无功优化。两种模型得到的网损(标么值)对比如表5所示,计算时间对比如表6所示。

表5 修改后的IEEE其他节点系统网损测试结果

算例	优化前	式(9)~式(19) 优化结果	式(21)~式(30) 优化结果
IEEE-30t	0.024	0.014	0.012
IEEE-39t	0.427	0.265	0.245
IEEE-39k	0.431	0.269	0.246
IEEE-57t	0.279	0.173	0.158
IEEE-57m	0.281	0.178	0.152
IEEE-118t	1.33	0.882	0.837
IEEE-118m	1.34	0.889	0.841

表6 修改后的IEEE其他节点系统计算耗时

(单位: s)

算例	式(9)~式(19)耗时	式(21)~式(30)耗时
IEEE-30t	0.032	0.016
IEEE-39t	0.040	0.023
IEEE-39k	0.045	0.028
IEEE-57t	0.052	0.035
IEEE-57m	0.056	0.037
IEEE-118t	0.242	0.108
IEEE-118m	0.253	0.117

由表5可见,式(21)~式(30)的优化效

果总优于式(9)~式(19)。由表6可见,式(21)~式(30)的计算效率高于式(9)~式(19)。从而进一步验证了本文所提方法的有效性和高效性。

结束语

本文研究了含VSC-HVDC的无功优化模型和算法,首先提出了含VSC-HVDC的无功优化模型,此模型为非线性非凸优化问题;为提高全局寻优能力和计算效率,本文又提出了一种变换算法,可将以上非线性非凸形式的无功优化问题转化为带二次约束的MIQP问题,可借助CPLEX予以高效求解。多个算例表明,基于MIQP的含VSC-HVDC的无功优化模型和算法具有很强的全局寻优能力,且具有很高的计算效率。本文的研究成果对VSC-HVDC控制参数的整定具有指导意义,从而优化系统的运行方式。

参考文献

- [1] 刘明波,谢敏,赵维兴.大电网最优潮流[M].北京:科学出版社,2010.
- [2] 姚煜,蔡燕春.离散粒子群与内点法结合的电力系统无功优化[J].电力系统保护与控制,2010,38(3):48-52.
- [3] 邸弢,李华强,范铭.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.
- [4] 汤广福.基于电压源换流器的高压直流输电技术[M].北京:中国电力出版社,2010.
- [5] 卫志农,胡文旺,孙国强,等.含VSC-HVDC的暂态稳定约束最优潮流[J].中国电机工程学报,2013,33(28):50-58.
- [6] 卫志农,季聪,郑玉平,等.计及VSC-HVDC的交直流系统最优潮流统一混合算法[J].中国电机工程学报,2014,34(4):635-643.

(收稿日期:2014-09-15) EA