

基于 Simplex 算法的 VSC-HVDC 控制参数优化

郭春义¹, 赵成勇¹, 李广凯², 饶宏², 黎小林²

(1. 华北电力大学 电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室, 北京 102206;

2. 南方电网技术研究中心, 广东 广州 510623)

摘要: 以电压源换流器高压直流输电(VSC-HVDC)的稳态模型为基础, 根据 VSC 功率传输方程的直角坐标形式, 采用逆系统方法和 PI 控制相结合的方法设计了 VSC 的有功功率和无功功率独立调节的 VSC-HVDC 控制系统。基于非线性单纯形 Simplex 算法, 对 PI 控制参数进行优化。PSCAD/EMTDC 下的仿真结果表明, 通过参数优化, VSC-HVDC 控制目标的最大误差百分比低于 1.5%; 同时也证明所设计的控制系统能独立控制有功功率和无功功率。

关键词: 电压源换流器; 高压直流输电; 控制系统; Simplex 算法; PI 参数优化

中图分类号: TM 711

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2010)09-0013-05

0 引言

20 世纪 90 年代以后, 电压源换流器高压直流输电(VSC-HVDC)得到了快速发展。其采用了可以自关断的可控器件, 具有以下主要技术特点^[1-6]: 可以灵活且快速地控制有功功率; 动态补偿无功功率; 具有四象限运行的特性; 可向无源网络供电等。近年来, VSC-HVDC 在国外得到了一些成功的应用, 并且日益受到重视^[7-8]。

VSC-HVDC 与有源交流网络相连时, 如果直接取 VSC 交流侧电压基波的幅值和相位为控制变量, VSC 是一个非线性的被控对象, 由于三角函数的影响, 其功率传输特性比较复杂, 而且被控量两通道间存在耦合作用, 仅采用线性 PID 控制器时, 控制的精度、速度以及稳定性均不理想。文献[9-11]对 VSC-HVDC 控制系统的设计进行了研究, 其中文献[9]通过坐标变换, 推导出功率传输方程的直角坐标形式。本文在此基础上采用逆系统方法和 PI 控制相结合的方法设计了 VSC 传输功率独立控制系统, 并实现了 VSC-HVDC 系统整流侧定直流电压和无功功率、逆变侧定有功和无功功率的运行控制方式。虽然文献[9]控制思路清晰, 方法简单, 但是没有对控制器的参数进行优化。本文在原始 PI 控制参数的基础上, 采用文献[12]中的非线性单纯形 Simplex 算法对 PI 控制参数进行了优化。基于 PSCAD/EMTDC 的仿真环境, 对所设计的控制器及 Simplex 优化算法进行了验证及分析。优化前后的仿真结果表明, 通过 Simplex 算法对 PI 控制参数进行优化后, VSC-HVDC 系统的运行性能得到了很大的改善; 同时也证明所设

计的控制可以独立控制有功功率和无功功率, 具有优良的控制品质, 验证了所设计控制系统的正确性和 Simplex 优化算法的有效性。

1 VSC-HVDC 的稳态物理模型

VSC 连接有源交流网络时的稳态物理模型如图 1 所示, 其中 L 为换流电抗器的等效电感; R 为 VSC 功率损耗的等效电阻; δ 为交流侧系统电压相位超前 VSC 交流侧电压基波相位的角度; P_s, Q_s 为交流系统输出的有功功率和无功功率; P_c, Q_c 为 VSC 吸收的有功功率和无功功率。

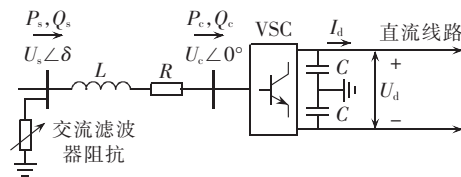


图 1 VSC-HVDC 的稳态模型

Fig.1 Steady state model of VSC-HVDC

令 $X = \omega L$, $\alpha = \arctan(R/X)$, $Y = 1/\sqrt{R^2 + X^2}$, 由图 1 可知:

$$P_c = U_s U_c Y \sin(\delta + \alpha) - U_c^2 Y \sin \alpha \quad (1)$$

$$Q_c = U_s U_c Y \cos(\delta + \alpha) - U_c^2 Y \cos \alpha \quad (2)$$

$$P_s = U_s U_c Y \sin(\delta - \alpha) + U_s^2 Y \sin \alpha \quad (3)$$

$$Q_s = -U_s U_c Y \cos(\delta - \alpha) + U_s^2 Y \cos \alpha \quad (4)$$

式(1)~(4)为系统中各处有功功率、无功功率与 U_c, δ 间的关系式; 式中电压变量均为线电压有效值, 功率变量均为三相功率。由式(1)~(4)可知, 调节 U_c 和 δ 即可控制 VSC 传输有功功率和无功功率的大小及流动方向。

U_c 的大小由直流线路电压 U_d 和 M 决定, 设所采用 PWM 技术的直流电压利用率为 1, 即 $0 \leq M \leq 1$, 有如下关系:

$$U_c = M U_d / \sqrt{2} \quad (5)$$

$\delta(-\pi \leq \delta \leq \pi)$ 的值由交流系统电压与调制波的相位差决定, 调节调制波相位即可改变 δ 的大小。

2 VSC-HVDC 控制系统设计

2.1 VSC-HVDC 的功率独立控制解析表达式

当 VSC-HVDC 系统两端连接有源交流网络时, 其为双输入、双输出的被控对象。对于 VSC-HVDC 系统传输的无功功率, 关心较多的是交流侧系统输出的无功功率 Q_s ; 而对于传输的有功功率, 依据实际情况, 可以关心系统输出的有功功率 P_s 或 VSC 吸收的有功功率 P_c 。在此, 把 P_c 和 Q_s 作为被控变量。

通过对式(1)~(4)的分析, 由于三角函数的影响, VSC 的功率传输特性比较复杂。为了能使功率控制时的耦合关系最小, 本文对其进行了变量代换。

引入变量 A 、 B 并定义如下:

$$\begin{cases} A = U_c \cos(\delta - \alpha) \\ B = U_c \sin(\delta - \alpha) \end{cases} \quad (6)$$

将式(6)代入式(1)(4), 化简可得:

$$Q_s = -U_s Y A + U_s^2 Y \cos \alpha \quad (7)$$

$$P_c = U_s Y B \cos 2\alpha - B^2 Y \sin \alpha + D \quad (8)$$

其中, $D = U_s Y A \sin 2\alpha - A^2 Y \sin \alpha$ 。

式(7)(8)即为 P_c 、 Q_s 传输方程的直角坐标形式。可知, 三角函数的影响被消除, 功率特性也可由一次、二次简单曲线描述, Q_s 与参数 A 之间的关系曲线为一直线, 有功功率 P_c 与参数 B 之间的关系曲线为一抛物线。直接取 M 和 δ 为输入控制量时, VSC 的两输出量与两输入量之间均存在较强的耦合作用; 而通过参数 A 、 B 调节控制量 M 、 δ 协调变化时, B 与 Q_s 的耦合作用可消除, 只存在 A 与 P_c 的单侧耦合作用。 D 的变化反映了 A 的变化对 P_c 所产生耦合作用大小, A 对 P_c — B 关系曲线的影响只是垂直方向的平移, 即耦合作用的影响较原来更有规律。

由式(7)(8)可知, P_c 、 Q_s 的最大值、最小值由 A 、 B 的取值决定; 需要注意的是, A 、 B 的取值会受到一些因素的限制, 如 U_d 以及 M 、 δ 的取值范围。

将式(5)代入式(6), 可得:

$$\begin{cases} A = M U_d \cos(\delta - \alpha) / \sqrt{2} \\ B = M U_d \sin(\delta - \alpha) / \sqrt{2} \end{cases} \quad (9)$$

可知, 参数 A 、 B 的最大值正比于 U_d , 即系统电压 U_s 不变时, P_c 、 Q_s 的调节范围受到 U_d 的制约。

当 $A = \pm U_d / \sqrt{2}$ 时, Q_s 取得极值:

$$Q_{s\max} = (U_s Y U_d + U_s^2 Y \cos \alpha) / \sqrt{2} \quad (10)$$

$$Q_{s\min} = -(U_s Y U_d + U_s^2 Y \cos \alpha) / \sqrt{2} \quad (11)$$

当 $A = U_s \sin 2\alpha / (2 \sin \alpha)$, $B = U_s \cos 2\alpha / (2 \sin \alpha)$ 时, P_c 取得最大值:

$$P_{c\max} = U_s^2 Y^2 / (4 Y \sin \alpha) \quad (12)$$

由式(9)以及参数 M 的取值范围可知, 参数 A 、

B 应满足如下关系:

$$\begin{cases} |A| \leq U_d / \sqrt{2} \\ |B| \leq U_d / \sqrt{2} \\ A^2 + B^2 \leq U_d^2 / 2 \end{cases} \quad (13)$$

由式(13)可知, 系统电压 U_s 不变时, 参数 A 和 B 取值范围由换流器直流侧电压决定。

2.2 VSC-HVDC 控制系统设计

2.2.1 定功率控制系统

以上推导出式(7)(8)的 P_c 、 Q_s 传输特性方程中, 仍有一个通道存在耦合作用, 但是已经可以求出控制量的解析表达式, 因此可以考虑采用逆系统和 PI 控制相结合的方法来设计非线性控制系统。

由式(8)可知, 参数 B 存在 2 个解, 考虑到经济合理性, B 的解取左根而舍掉右根。由式(7)~(9)可得 P_c 、 Q_s 与 M 、 δ 之间的逆关系如下:

$$A = (U_s^2 Y \cos \alpha - Q_s) / (U_s Y) \quad (14)$$

$$B = [-k_2 - \sqrt{k_2^2 - 4k_1(P_c - D)}] / (2k_1) \quad (15)$$

$$\delta = \begin{cases} \arctan(B/A) + \alpha & A > 0 \\ \arctan(B/A) + \alpha + \pi & A \leq 0, B \geq 0 \\ \arctan(B/A) + \alpha - \pi & A \leq 0, B < 0 \end{cases} \quad (16)$$

$$M = \sqrt{2} A / [U_d \cos(\delta - \alpha)] \quad (17)$$

其中, $k_1 = Y \sin \alpha$, $k_2 = -U_s Y \cos 2\alpha$ 。

采用逆系统方法所设计的控制系统如图 2 所示, 其中 P_{ref} 、 Q_{ref} 为被控量的参考输入, 即设定值; 在调节区间内, 参数 A 、 B 和 Q_s 、 P_c 之间的关系满足单调性, 因此可以采用 PI 控制器消除被控量与设定值间的误差。为了保证 M 、 δ 不超出取值范围, 同时又保持设定的关系, 应按式(13)对参数 A 、 B 进行限幅。

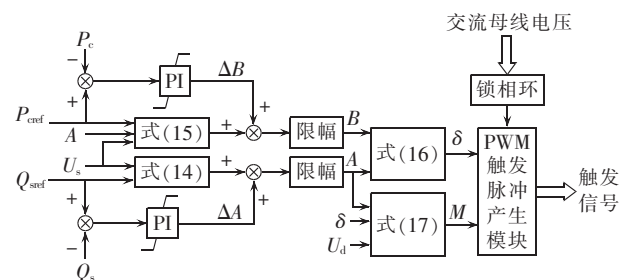


图 2 P_c 、 Q_s 控制系统结构图

Fig.2 Structure of P_c and Q_s control system

2.2.2 定直流电压控制系统

两侧联接有源网络的 VSC-HVDC 系统稳态物理模型如图 3 所示。在本文中, 定直流电压的控制方式通过整流侧的换流站来实现; 而逆变侧的换流站实现定有功功率控制方式, 采用图 2 所示的控制系统。下面设计定直流电压端控制系统。

直流线路电压取决于直流侧电容储存能量的多少, 若要使其保持恒定, 则需调节 VSC 吸收的功率使电容储存能量不变化。VSC 传送到直流侧的有功功率可以分成 2 部分, 一部分为传送到直流线路上的功率 P_d , 另一部分为流入直流侧电容的功率 P_{dc} , 即

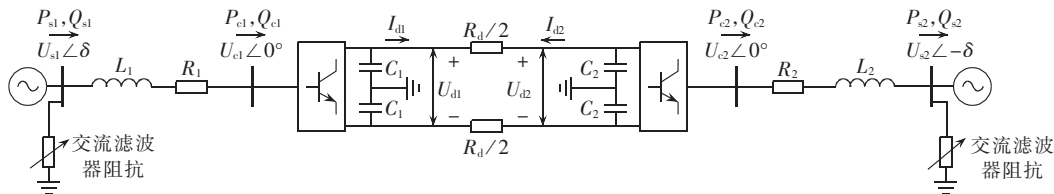


图 3 两端 VSC-HVDC 系统图
Fig.3 Two-terminal VSC-HVDC system

$$P_{e1} = P_d + P_{dc} \quad (18)$$

$$P_d = U_{d1} I_{d1} \quad (19)$$

$$\Delta(U_{d1}^2) = 4P_{dc} \Delta t / C_1 \quad (20)$$

由式(20)可知,直流线路电压平方值的变化量和 P_{dc} 成正比,采用 PI 控制器即可满足控制要求。在暂态过程中,直流线路电压改变后会导致 P_d 变化,故需考虑对 P_d 变化量的补偿。利用下式估计 P_d :

$$P_d(t + \Delta t) = \frac{U_{d1}^2(t + \Delta t)}{U_{d1}^2(t)} P_d(t) = \left(1 + \frac{4P_{dc}(t)\Delta t}{C_1 U_{d1}^2(t)}\right) P_d(t) \quad (21)$$

其中, $P_d(t + \Delta t)$ 为直流电压改变后直流线路上功率的估计值, Δt 取为 1 个采样周期。

所设计的定直流电压控制系统如图 4 所示,其中功率独立控制系统即图 2 中的 P_e, Q_s 控制系统。

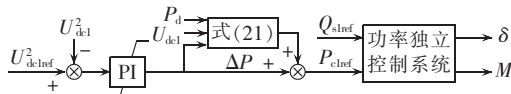


图 4 定直流电压控制系统图

Fig.4 Control system of fixed DC voltage

3 基于 Simplex 的控制参数优化

3.1 Simplex 优化算法

Simplex 算法由 Nelder 和 Mead 提出,是基于何形状考虑的启发式优化算法。在 n 维空间中,单纯形是指以 $n+1$ 个顶点所构成的最简单图形。单纯形算法不是沿一个方向进行搜索,而是对 n 维空间的 $n+1$ 个点(单纯形的顶点)上的函数值进行比较,丢掉其中最坏的点,代之以新的点,从而构成新的单纯形,逐步逼近最优值^[13-16]。

对于本文研究的 VSC-HVDC 控制系统,设定目标函数为^[12]

$$O_f(X) = \sum_{j=1}^4 \omega_j \int_0^T |e_j(t)| dt = \sum_{j=1}^4 \int_0^T |e_j(t)| dt \quad (22)$$

其中, $e_j(t)$ 为第 j 个被控量与其参考值之间的差值, ω_j 为第 j 个被控量对应的加权系数,若 ω_j 相等说明各个目标具有相同的权重。

Simplex 优化算法通过折射、反射和扩张的迭代方法达到最优点。利用 Simplex 优化 VSC-HVDC 控制系统参数的流程图如图 5 所示^[12]。参数 $X = (k_1, T_1, k_2, T_2, k_3, T_3, k_4, T_4)$, 分别对应整流侧直流电压控制器、整流侧无功功率控制器、逆变侧有功功率控制器和逆变侧无功功率控制器的比例和微分环节参数。

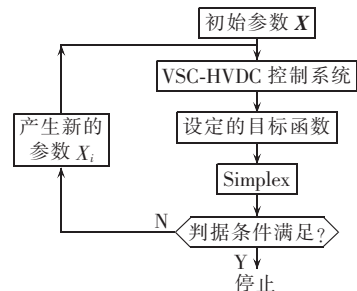


图 5 VSC-HVDC 控制系统参数优化流程图

Fig.5 Flowchart of VSC-HVDC control system parameter optimization

3.2 控制参数优化

设定系统目标参考值如下: $U_{dlref} = 120$ kV, $Q_{slref} = -20$ Mvar, $P_{c2ref} = 50$ MW, $Q_{s2ref} = 10$ Mvar。

用 Simplex 算法对所设计的控制系统参数进行优化,优化前后 PI 参数及目标函数值如表 1 所示。

表 1 优化前后控制参数及目标方程值的比较

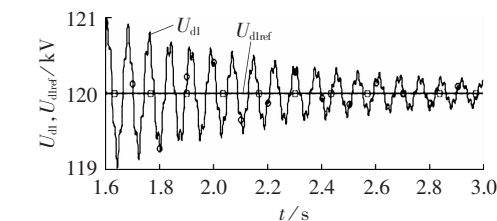
Tab.1 Comparison of parameters and objectives between before and after optimization

参数	优化前	优化后
K_1	0.20	0.163
T_1/s	0.05	0.198
K_2	0.40	0.332
T_2/s	0.05	0.036
K_3	0.80	0.904
T_3/s	0.23	0.214
K_4	0.70	0.324
T_4/s	0.04	0.176
$O_f(X)$	54.66	27.72

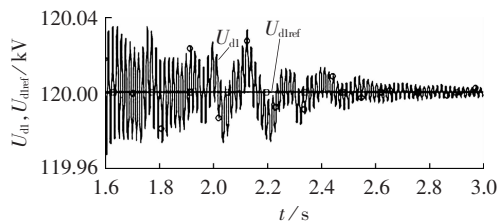
4 仿真分析及验证

为了验证所设计控制系统的正确性和 Simplex 优化算法的有效性,利用 PSCAD/EMTDC 对图 3 所示的 VSC-HVDC 系统优化前后的稳态特性进行了仿真分析。系统参数如下:频率为 50 Hz,整流侧线电压 U_{s1} 有效值为 13.8 kV,逆变侧线电压 U_s 有效值为 115 kV。整流侧和逆变侧的 R 均为 0.6Ω , L 均为 15 mH,电容值均为 $500 \mu F$,直流线路电阻 R_d 为 5Ω ;整流变压器变比为 13.8 kV/62.5 kV;逆变器变比为 62.5 kV/115 kV;直流电压参考值为 120 kV。优化前后 VSC-HVDC 的稳态运行特性如图 6~9 所示。

从仿真结果可知,利用 Simplex 算法对 PI 控制参数进行优化后,系统性能得到了很大改善,控制精度明显提高。优化前后系统目标值最大误差比较如表 2 所示。



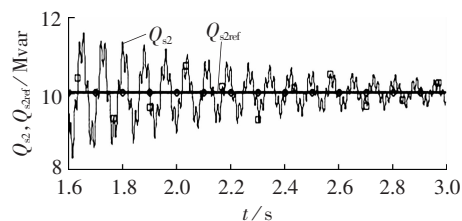
(a) 优化前



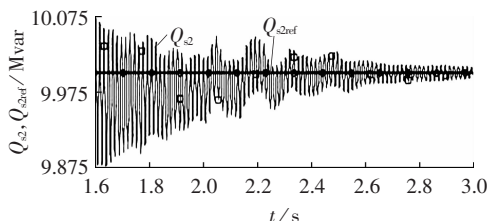
(b) 优化后

图 6 整流侧直流电压优化前后的比较

Fig.6 Comparison of DC voltage at rectifier side between before and after optimization



(a) 优化前



(b) 优化后

图 9 逆变侧无功功率优化前后的比较

Fig.9 Comparison of reactive power at inverter side between before and after optimization

表 2 优化前后控制目标最大误差百分比的比较

Tab.2 Comparison of maximum error percentage between before and after optimization

控制目标	最大误差 / %	
	优化前	优化后
U_{d1}	1.04	0.033
Q_{s1}	12.5	0.625
P_{c2}	2	0.6
Q_{s2}	20	1.25

从表 2 可知, VSC-HVDC 系统的控制参数经过 Simplex 算法优化后, 系统目标值最大误差明显减小。其中, 整流侧直流电压、整流侧无功功率、逆变侧有功功率和逆变侧无功功率的最大误差百分比分别降低到原来的 3.2%、5%、30.3% 和 6.25%。而且, 通过 Simplex 算法进行优化后, 可以同时得到多组优化参数, 为系统 PI 参数的选择提供多组参考值。但该优化算法也有不足之处, 即 Simplex 优化过程需要多次迭代, 耗时较长, 所以不适于在线参数优化。

5 结论

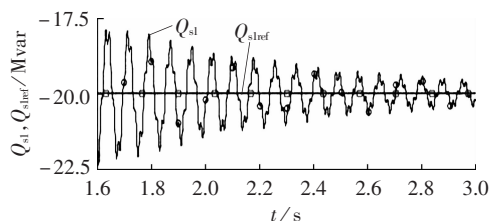
本文根据 VSC-HVDC 稳态模型基础上的直角坐标功率传输方程, 采用逆系统和 PI 控制相结合的方法设计了相应的有功功率和无功功率独立控制系统, 并用 Simplex 算法对控制系统的 PI 参数进行了优化。在 PSCAD/EMTDC 仿真环境下对优化前后系统的稳态性能进行了仿真比较及分析, 得到以下结论:

a. 所设计的控制系统可以实现有功功率和无功功率的独立控制;

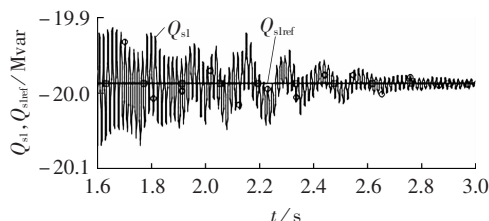
b. Simplex 算法可以用来对 VSC-HVDC 系统的 PI 控制参数进行优化, 仿真结果表明, 通过参数优化, 系统性能得到很大改善;

c. 在所设计的控制系统的基础上, 应用 Simplex 算法进行参数优化后, 控制系统具有很高的控制精度;

d. Simplex 优化算法可以同时提供多组优化参



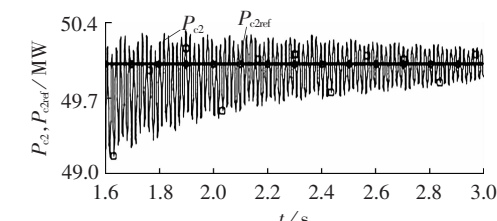
(a) 优化前



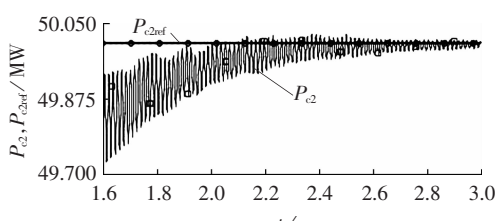
(b) 优化后

图 7 整流侧无功功率优化前后的比较

Fig.7 Comparison of reactive power at rectifier side between before and after optimization



(a) 优化前



(b) 优化后

图 8 逆变侧有功功率优化前后的比较

Fig.8 Comparison of active power at inverter side between before and after optimization

数,但由于其迭代次数较多,不适于在线参数优化。

参考文献:

- [1] 徐政. 交直流电力系统的动态行为分析[M]. 北京:机械工业出版社,2004:12-13.
- [2] 阮思焯,孙元章,李国杰. 用电压源型高压直流输电解决高压电网中工业系统引起的电能质量问题[J]. 电网技术,2007,31(19):13-17.
RUAN Siye,SUN Yuanzhang,LI Guojie. Utilizing VSC-HVDC to solve power quality problem in power grid caused by industry system[J]. Power System Technology,2007,31(19):13-17.
- [3] 汤广福,贺之渊,滕乐天,等. 电压源换流器高压直流输电技术最新研究进展[J]. 电网技术,2008,32(22):39-44.
TANG Guangfu,HE Zhiyuan,TENG Letian,et al. New progress on HVDC technology based on voltage source converter[J]. Power System Technology,2008,32(22):39-44.
- [4] 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.
- [5] 郑超,周孝信,李若梅. 电压源换流器式高压直流输电的动态建模与暂态仿真[J]. 电网技术,2005,29(16):1-5.
ZHENG Chao,ZHOU Xiaoxin,LI Ruomei. Dynamic modeling and transient simulation for voltage source converter based HVDC[J]. Power System Technology,2005,29(16):1-5.
- [6] 赵琬君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京:中国电力出版社,2004:48-52.
- [7] JACOBSON B,JIANG-HAFNER Y,PREY,et al. HVDC with voltage source converters and extruded cables for up to 300 kV and 1000 MW[C]//CIGRE. Paris,France:[s.n.],2006:105.
- [8] ANDERSEN B R,XU L,HORTON P J,et al. Topologies for VSC transmission[J]. Power Engineering Journal,2002,16(3):142-150.
- [9] 赵成勇,李金丰,李广凯. 基于有功功率和无功率独立调节的VSC-HVDC控制策略[J]. 电力系统自动化,2005,29(9):20-24.
ZHAO Chengyong,LI Jinfeng,LI Guangkai. VSC-HVDC control strategy based on respectively adjustment of active and reactive power[J]. Automation of Electric Power Systems,2005,29(9):20-24.
- [10] 尹明,李庚银,牛同义,等. VSC-HVDC 连续时间状态空间模型及其控制策略研究[J]. 中国电机工程学报,2005,25(18):34-39.
YIN Ming,LI Gengyin,NIU Tongyi,et al. Continuous-time state-space model of VSC-HVDC and its control strategy[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(18):34-39.
- [11] 李金丰,李广凯,赵成勇,等. 三相电压不对称时带有电压源换流器的HVDC系统的控制策略[J]. 电网技术,2005,29(16):16-19.
LI Jinfeng,LI Guangkai,ZHAO Chengyong,et al. Control strategy for VSC-HVDC system under unsymmetry of three phase voltage[J]. Power System Technology,2005,29(16):16-19.
- [12] ZHAO Chengyong,LU Xiangdong,LI Guangkai. Parameters optimization of VSC-HVDC control system based on simplex algorithm[C]//2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting. Tampa,Florida,USA:[s.n.],2007:1-7.
- [13] MIURA K,HASHIMOTO K,GANGLOFF J,et al. Visual servoing without Jacobian using modified simplex optimization [C]//Proc 2005 IEEE International Conference on Robotics Automation. Barcelona,Spain:[s.n.],2005:3504-3509.
- [14] PRESS W H,TEUKOLSKY S A,VETTERLING W T,et al. Numerical recipes in C the art of scientific computing[M]. 2版. 北京:电子工业出版社,1995:346-350.
- [15] KONG Ruirui,QIU Runchen,ZHOU Kouhui. An accelerated simplex method[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology,2003,27(2):209-213.
- [16] GOLE A M,FILIZADE S,MENZIES R W,et al. Optimization-enabled electromagnetic transient simulation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2005,20(1):512-518.

(编辑:李育燕)

作者简介:

郭春义(1984-),男,山西阳泉人,博士研究生,研究方向为直流输电(E-mail:freesky_guo@163.com);

赵成勇(1964-),男,浙江丽水人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为直流输电、电能质量分析与控制等(E-mail:chengyongzhao@ncepu.edu.cn);

李广凯(1975-),男,山东聊城人,讲师,博士,主要研究方向为新型输配电技术、电能质量;

饶宏(1961-),男,湖北武汉人,教授级高级工程师,长期从事交直流电力系统及高压直流输电的研究、设计、建设和管理工作;

黎小林(1963-),男,湖南邵阳人,高级工程师,硕士,从事直流输电和FACTS方面的研究。

Control parameter optimization based on Simplex algorithm for VSC-HVDC

GUO Chunyi¹,ZHAO Chengyong¹,LI Guangkai²,RAO Hong²,LI Xiaolin²

(1. Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control under Ministry of Education,North China Electric Power University,Beijing 102206,China;

2. The Technology Research Center of China Southern Power Grid,Guangzhou 510623,China)

Abstract: According to the rectangular coordinates form of VSC's power transmission equations,a VSC-HVDC(Voltage Source Converter based High Voltage Direct Current transmission) control system combined with the inverse system method and PI control is designed based on its steady state model,which regulates the active power and reactive power individually. The PI control parameters are optimized by Simplex algorithm. Simulations with PSCAD/EMTDC show that,with the optimized parameters,the maximum error percentage of VSC-HVDC control objectives is less than 1.5% and the active and reactive power can be controlled respectively.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China(50577018) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities(09QX62).

Key words: voltage source converter; HVDC; control system; Simplex algorithm; PI parameter optimization