

基于粒子群优化算法的 VSC-HVDC 系统的 控制参数优化策略

杨佳艺¹, 赵成勇¹, 苑 宾¹, 李 探²

(1. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206; 2. 国网北京经济技术研究院, 北京 102209)

摘要: 建立了双端基于电压源型换流器的高压直流输电(VSC-HVDC)系统的小信号模型;利用特征根分析法,基于线性化状态空间模型,将与系统特征根直接相关的振荡模式和衰减模式的罚函数作为目标函数;提出了基于粒子群优化算法的 VSC-HVDC 系统的控制参数优化策略,对整个系统的控制参数同时进行整体优化。仿真结果验证了小信号模型的正确性;优化后的系统在小扰动、大扰动、潮流反转及故障情况下均具有较高的控制精度,整个系统的稳态与暂态特性均得到较大改善。

关键词: VSC-HVDC; 小信号模型; 参数优化; 粒子群优化算法; 罚函数

中图分类号: TM 723

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.12.025

0 引言

基于电压源型换流器的高压直流输电(VSC-HVDC)技术充分利用可关断电力电子器件及其换流技术,克服了传统直流输电技术不能接入无源网络、对交流系统强度敏感、容易发生换相失败、无功消耗量大等缺点,能更好地适用于可再生能源并网、分布式发电并网、孤岛供电、城市电网供电、异步交流电网互联等领域^[1-3]。

快速精确的控制对 VSC-HVDC 系统的良好运行具有重要作用,目前工程中主要采用矢量电流控制策略^[4]。每个换流站包含 5 组比例积分(PI)控制参数(有功类外环、内环控制,无功类外环、内环控制,锁相环(PLL)),若采用试凑法选择控制参数不仅会耗费大量的时间与精力,且难以找到最优的控制参数。目前,国内外学者采用了诸多算法整定 PI 参数,文献[5-9]以误差积分性能指标(ITAE)作为目标函数,逐步逼近以得到最优控制参数,但这些文献采用的优化方法均是基于时域的非线性数学模型,对基于线性化状态空间模型的参数优化方法研究较少。而线性化后的小信号模型可以直接利用系统特征根作为目标函数寻找最优参数,能显著提高优化的速度和精度。文献[10-13]分别建立了单端、双端、多端以及向无源网络供电的 VSC-HVDC 系统的小信号模型,对相关影响因素进行了分析并优化设计了部分控制器参数,但其只对控制参数进行了局部优化,没有考虑所有控制器参数的共同影响。文献[14-15]提出了一种基于线性化状态空间模型的特征根灵敏度迭代法来确定最优参数,其只考虑了主导极点,但寻优过程中参数的调节会引起主导极点的多次变化,非主

导极点也有可能变化成主导极点从而影响系统稳定性,并且其没有研究这个方法的适用范围。

针对以上原因,本文提出一种基于粒子群优化(PSO)算法并以 VSC-HVDC 系统小信号模型为基础的控制参数全局优化策略。首先,建立系统的主电路模型,推导双端 VSC-HVDC 系统的小信号模型;其次,考虑多种运行点,利用参与因子分析法和特征根分析法分析影响系统稳定性的关键因素,将振荡模式和衰减模式的罚函数作为目标函数;然后,设计了基于 VSC-HVDC 系统的 PSO 算法优化策略,目的是快速地同时调节所有的控制器参数;最后,在 PSCAD/EMTDC 中搭建双端 VSC-HVDC 系统,仿真结果验证了小信号模型的正确性,同时证明了优化后的控制器参数能较好地改善系统的稳态及暂态特性。

1 主电路模型

本文构建的双端 VSC-HVDC 系统的小信号模型见图 1。左侧 VSC₁ 为逆变侧,采用定直流电压和定交流电压控制;右侧 VSC₂ 为整流侧,采用定有功功率和定交流电压控制。规定正方向为交流系统流向直流侧。图中,下标 1 表示左侧逆变侧的电气量,下标 2 表示右侧整流侧的电气量; R_g 和 L_g 分别为交流系统等效电阻和电感; L_c 为换流变压器和联结电抗器的等效电感; C_f 为交流滤波器电容; R_{dc} 和 L_{dc} 分别为直流线路等效电阻和电感; C 为直流电容。

2 VSC-HVDC 系统小信号建模

由于文献[16-17]已详细叙述了 VSC-HVDC 系统的建模方法,本文不再赘述。将交流系统侧、直流侧、控制器和锁相环的状态空间方程联立,并在某一稳态运行点处线性化得 VSC-HVDC 系统的小信号

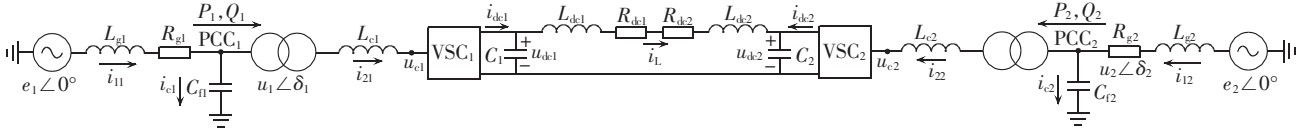


图 1 双端 VSC-HVDC 系统等效模型

Fig.1 Equivalent model of double-terminal VSC-HVDC system

模型如下:

$$\Delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \Delta \mathbf{x} + \mathbf{B} \Delta \mathbf{u} \quad (1)$$

$$\Delta \mathbf{x} = [\Delta \mathbf{x}_1, \Delta \mathbf{x}_2, \Delta \mathbf{x}_3]^T$$

$$\Delta \mathbf{x}_1 = [\Delta i_{ld1}, \Delta i_{lq1}, \Delta i_{2d1}, \Delta i_{2q1}, \Delta u_{d1}, \Delta u_{q1}, \Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3, \Delta x_4, \Delta \theta_1, \Delta \omega_1]^T$$

$$\Delta \mathbf{x}_2 = [\Delta i_L, \Delta u_{dc1}, \Delta u_{dc2}]^T$$

$$\Delta \mathbf{x}_3 = [\Delta i_{ld2}, \Delta i_{lq2}, \Delta i_{2d2}, \Delta i_{2q2}, \Delta u_{d2}, \Delta u_{q2}, \Delta x_5, \Delta x_6, \Delta x_7, \Delta x_8, \Delta \theta_2, \Delta \omega_2]^T$$

其中, $\mathbf{A}$ 为 27×27 阶状态矩阵; $\Delta \mathbf{x}$ 为状态变量, VSC₁ 侧状态变量为 12 阶, 直流侧为 3 阶, VSC₂ 侧为 12 阶; $\mathbf{B}$ 为 27×4 阶输入矩阵; $\Delta \mathbf{u}$ 为输入量, $\Delta \mathbf{u} = [\Delta u_{dref}, \Delta u_{1ref}, \Delta P_{2ref}, \Delta u_{2ref}]^T$; i_{ld1} 、 i_{lq1} 和 i_{ld2} 、 i_{lq2} 分别为逆变侧和整流侧的交流侧电流的 d 、 q 轴分量; i_{2d1} 、 i_{2q1} 、 i_{2d2} 、 i_{2q2} 和 u_{d1} 、 u_{q1} 、 u_{d2} 、 u_{q2} 分别为变压器副边电流和公共连接点(PCC)电压的 d 、 q 轴分量; x_1 、 x_3 分别为逆变侧定直流电压控制外环、内环的积分环节, x_2 、 x_4 分别为逆变侧定交流电压控制外环、内环的积分环节, x_5 、 x_7 分别为整流侧定有功功率控制外环、内环的积分环节, x_6 、 x_8 分别为整流侧定交流电压控制外环、内环的积分环节; θ_1 和 θ_2 为锁相环输出相角; ω_1 和 ω_2 为角速度; i_L 、 u_{dc1} 和 u_{dc2} 分别为直流电流、直流电容两端电压。

交流系统侧、直流侧和控制系统的数学模型如式(2)~(5)所示。

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \omega L_g \begin{bmatrix} -i_{lq} \\ i_{ld} \end{bmatrix} + R_g \begin{bmatrix} i_{ld} \\ i_{lq} \end{bmatrix} + L_g \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ld} \\ i_{lq} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_{cd} \\ u_{cq} \end{bmatrix} = \omega L_c \begin{bmatrix} -i_{2q} \\ i_{2d} \end{bmatrix} + L_c \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{2d} \\ i_{2q} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} i_{ld} \\ i_{lq} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_{2d} \\ i_{2q} \end{bmatrix} = \omega C_f \begin{bmatrix} -u_q \\ u_d \end{bmatrix} + C_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} (L_{dc1} + L_{dc2})(di_L/dt) + (R_{dc1} + R_{dc2})i_L = u_{dc1} - u_{dc2} \\ C_1(du_{dc1}/dt) = i_{dc1} - i_L, \quad C_2(du_{dc2}/dt) = i_{dc2} + i_L \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} dx_1/dt = u_{dcref} - u_{dc1}, \quad dx_2/dt = u_{1ref} - u_1 \\ dx_5/dt = P_{2ref} - P_2, \quad dx_6/dt = u_{2ref} - u_2 \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} dx_3/dt = i_{2dref1} - i_{2d1}, \quad dx_4/dt = i_{2qref1} - i_{2q1} \\ dx_7/dt = i_{2dref2} - i_{2d2}, \quad dx_8/dt = i_{2qref2} - i_{2q2} \end{cases} \quad (5)$$

3 基于 PSO 算法的 VSC-HVDC 系统控制参数的优化

3.1 PSO 算法

文献[18]详细介绍了 PSO 算法的基本思想, 假设 D 维空间里共有 N_1 个粒子, 粒子根据式(6)更新自己的速度和位置。

$$\begin{cases} v_{ij}^{k+1} = wv_{ij}^k + r_1 a_1 (p_{ij} - x_{ij}^k) + r_2 a_2 (p_{gj} - x_{ij}^k) \\ x_{ij}^{k+1} = x_{ij}^k + v_{ij}^k \end{cases} \quad (6)$$

其中, $i=1, 2, \dots, N_1$; $j=1, 2, \dots, D$; w 为惯性权重; r_1 和 r_2 为 $[0, 1]$ 范围内的均匀随机数; a_1 和 a_2 为加速常数; v_{ij}^k 和 x_{ij}^k 分别为粒子 i 在第 k 次迭代中第 j 维的速度和位置, 两者均被限制在可移动范围内; p_{ij} 为第 i 个粒子在第 j 维空间所经历的最优位置; p_{gj} 为粒子群所有粒子在第 j 维所经历的最优位置。

3.2 目标函数

通过分析式(1)中矩阵 $\mathbf{A}$ 的特征根就能判断系统的小信号稳定性, 当所有的特征根都在参考坐标系左半平面时, 系统是稳定的。当系统运行在某个特定的运行点时, 特征根的大小取决于控制器参数的合理性。

系统的稳定性由特征根确定, 特征根分为 2 类^[19]。实数特征根对应于一个非振荡模式。负实数特征根表示衰减模式, 幅值越大, 衰减越快。复数特征根对应于一个振荡模式。一对复数特征根的阻尼比决定振荡幅值的衰减速度, 阻尼比越大, 衰减越快。所以, 建立的目标函数要使得所有的实数特征根在左半平面且远离虚轴, 并能提高复数特征根的阻尼比。考虑到可能的运行点, 设定目标函数为:

$$\min O = \sum_{m=1}^M \left\{ \sum_{n=1}^N [\alpha_{mn} P^{\lambda_0(m,n)} + \beta_{mn} P^{\lambda_i(m,n)}] \right\} \quad (7)$$

其中, M 为运行点的数目; N 为每个运行点特征根的数目; α_{mn} 和 β_{mn} 为 2 类罚函数的权重, 其大小由特征根距离虚轴的远近和阻尼比确定, 离虚轴越近或阻尼比越小, 权重越大, 表示惩罚越大; $P^{\lambda_0(m,n)}$ 为第 m 个粒子第 n 个振荡模式的罚函数, $P^{\lambda_i(m,n)}$ 为第 m 个粒子第 n 个衰减模式的罚函数。

对于每个粒子 ($m=1, 2, \dots, M$), 振荡模式罚函数 $P^{\lambda_0(n)}$ 的表达式为:

$$P^{\lambda_0(n)} = \begin{cases} 0 & \zeta_n \leq \zeta_d \\ \zeta_d - \zeta_n & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

其中, ζ_n 为第 n 个振荡模式的阻尼比; ζ_d 为对应的期望阻尼比。

对于每个粒子 ($m=1, 2, \dots, M$), 衰减模式罚函数 $P^{\lambda_i(n)}$ 的表达式为:

$$P^{\lambda_i(n)} = \begin{cases} 0 & \sigma_n \leq \sigma_d \\ \sigma_n - \sigma_d & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

其中, σ_n 为第 n 个特征根; σ_d 为对应的实数特征根的期望值。

由参与因子分析可知,特征根主要受主回路参数或控制器参数的影响。文献[20]研究发现,若增大受主回路参数影响的振荡模式的阻尼比,其余特征根的特性会受到很大的影响,这种现象在弱系统中尤为明显。因此,需要将这些特殊的受主回路参数影响的振荡模式识别出来,并单独设定其期望阻尼比。

3.3 优化控制参数

PSO 算法中,粒子的适应度值表示目标函数,位置表示控制器参数,速度表示控制器参数的调整值,个体极值表示每个粒子的最优适应度值,全局极值表示所有粒子搜索到的最优适应度值,全局极值的粒子对应的位置就是最优控制参数值。算法流程如图 2 所示。

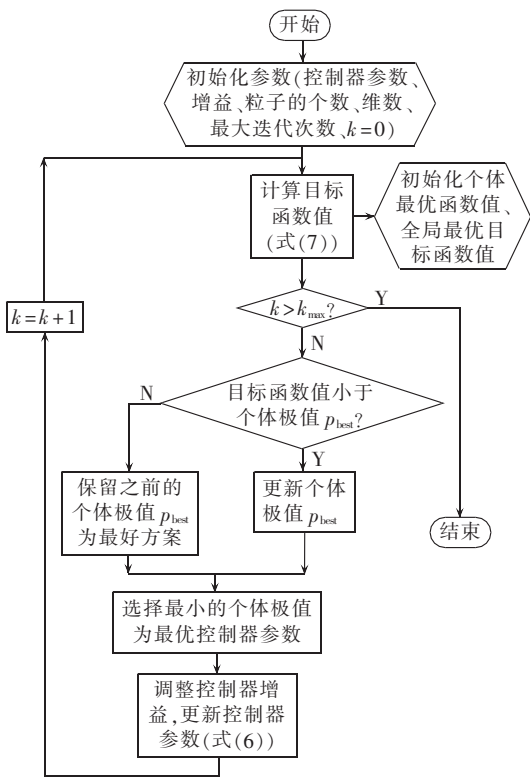


图 2 PSO 算法流程图

Fig.2 Flowchart of PSO algorithm

结合实际情况,4 个外界输入值(标么值)的可能取值如表 1 所示,通过排列组合,优化算法共考虑

表 1 VSC-HVDC 系统运行点

Table 1 Operating points of VSC-HVDC system

P_{2ref}	u_{dref}	u_{1ref}	u_{2ref}
1.00	1.10	1.10	1.10
0.75	1.05	1.05	1.05
0.50	1.00	1.00	1.00
0.25	0.95	0.95	0.95
0	0.90	0.90	0.90
-0.25	—	—	—
-0.50	—	—	—
-0.75	—	—	—
-1.00	—	—	—

了 $9 \times (C_5^1)^3 = 1125$ 个运行点。

表 2 列举了 PSO 算法的各参数值。其中,权重 α_{mn} 和 β_{mn} 与每次迭代特征根的数值相关,每迭代一次, α_{mn} 和 β_{mn} 分别随 ζ_n 和 σ_n 的变化而调整,以确保目标函数向最优值不断逼近。

表 2 PSO 算法参数值

Table 2 Parameters of PSO algorithm

参数	数值	参数	数值
D	20	N_1	40
k_{max}	200	w	1
a_1	2	a_2	2
M	625	σ_d	-10
N	27	ζ_d	20% (受主回路参数影响) 80% (受控制器参数影响)
α_{mn}	$4(0 \leq \zeta_n \leq 10\%)$ $3(10\% < \zeta_n \leq 20\%)$ $2(20\% < \zeta_n \leq 50\%)$ $1(50\% < \zeta_n \leq 80\%)$	β_{mn}	$3(-3 \leq \sigma_n \leq 0)$ $2(-5 \leq \sigma_n < -3)$ $1(-10 \leq \sigma_n < -5)$

3.4 算例验证

在 MATLAB/Simulink 软件中用 PSO 算法对所设计系统的控制参数进行优化,优化前后 PI 参数如表 3 所示。

表 3 优化前后的控制参数比较

Table 3 Comparison of parameters between before and after optimization

电压源换流器	参数	优化前	优化后
VSC ₁	k_{ip1}, k_{ip1}	0.08, 0.006	1.021, 0.008
	k_{pi1}, k_{ii1}	0.04, 0.8	0.02, 8.2
	k_{pi1}, k_{ii1}	0.08, 0.006	0.08, 0.062
	k_{pi2}, k_{ii2}	0.04, 0.8	0.01, 5.6
	k_{pi1}, C_1	500, 50	498.74, 51.197
VSC ₂	k_{ip2}, k_{ip2}	0.02, 0.1	0.016, 0.0005
	k_{pi2}, k_{ii2}	0.08, 2	0.084, 0.26
	k_{pi2}, k_{ii2}	0.02, 0.1	2.43, 0.018
	k_{pi2}, k_{ii2}	0.08, 2	0.069, 0.12
	k_{pi2}, C_2	500, 50	499.91, 50.03

目标函数值随迭代次数的变化情况如图 3 所示。可见,随着迭代次数的增加,目标函数值不断减小,最后达到稳定值。多次运行 PSO 算法,目标函数均能较快地收敛到最优值,平均收敛次数约为 49 次,这说明基于 VSC-HVDC 系统的 PSO 算法优化策略稳定性较高。

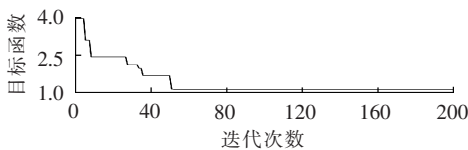


图 3 目标函数收敛曲线

Fig.3 Convergent curve of objective function

4 仿真实验

4.1 小信号模型验证

为验证小信号模型的正确性,在 PSCAD/EMTDC

环境中搭建如图 1 所示的双端 VSC-HVDC 系统的电磁暂态模型,具体参数如下:逆变站及所连交流系统中 $e_1=204.12$ kV, $R_{g1}+jX_{g1}=5+j37.98$ Ω , $C_{f1}=3.4382$ μ F, $L_{c1}=0.0663$ H;整流站及所连交流系统中 $e_2=204.12$ kV, $R_{g2}+jX_{g2}=75.96$ Ω , $C_{f2}=3.4382$ μ F, $L_{c2}=0.0663$ H;直流线路中 $C_1=C_2=500$ μ F, $L_{dc1}=L_{dc2}=0.01$ H, $R_{dc1}=R_{dc2}=1$ Ω ;控制器中 $u_{dcref}=400$ kV, $u_{lref}=204.12$ kV, $P_{2ref}=300$ MW, $u_{2ref}=204.12$ kV。同时,在 MATLAB/Simulink 软件中建立同样的小信号模型,对比电磁暂态模型以验证本文建立的小信号模型的正确性。

为了模拟小扰动,在 $t=5$ s 时,令整流侧的有功功率参考值 P_{2ref} 从 300 MW 阶跃上升至 330 MW,并在 $t=6$ s 时恢复额定运行。系统各物理量的仿真波形如图 4 所示。图中,从上到下依次为整流侧有功功率 P_2 (标么值,后同)、整流侧直流电压 u_{dk2} 、直流电流 i_d 、逆变侧 PCC 处电压 d 轴分量 u_{dl} 在电磁暂态模型及小信号模型下的仿真波形。随着整流侧有功功率参考值的波动,整流侧及逆变侧各物理量的电磁暂态模型均能精确地与小信号模型匹配,小信号模型的正确性得到了验证。

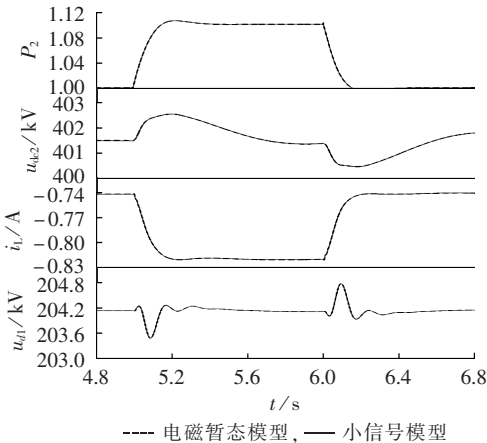


图 4 仿真波形
Fig.4 Simulative waveforms

4.2 参数优化仿真对比

在 PSCAD/EMTDC 环境中分别应用优化前、后的控制参数对系统进行仿真,并设置小扰动、大扰动、潮流反转和故障以得到系统的动态响应特性。下文图中实线为优化前的响应曲线,虚线为优化后的响应曲线。

4.2.1 P_{2ref} 从 1.0 p.u. 阶跃上升到 1.1 p.u.

图 5 为当整流侧有功功率参考值在 5 s 从 1.0 p.u. 阶跃上升至 1.1 p.u. 时,有功功率、直流电压、直流电流、交流电压优化前后的响应曲线。可见,参数优化后不仅提高了响应速度,而且降低了振荡幅值,尤其是降低了直流电压和交流电压的超调量。因此,优化参数后的系统具有更好的响应特性。

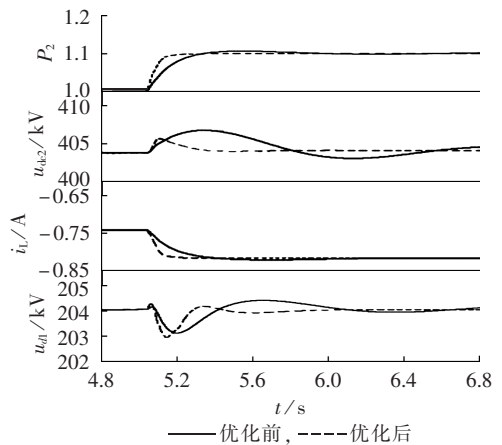


图 5 有功功率阶跃时的仿真波形
Fig.5 Simulative waveforms when active power step changes

4.2.2 U_{dcref} 从 0.95 p.u. 阶跃上升到 1.0 p.u.

图 6 为直流电压参考值 U_{dcref} 在 $t=5$ s 从 380 kV (0.95 p.u.) 阶跃上升至 400 kV (1.0 p.u.) 时,各物理量优化前后的响应曲线,可见优化后的各物理量均能较快到达新的稳态。

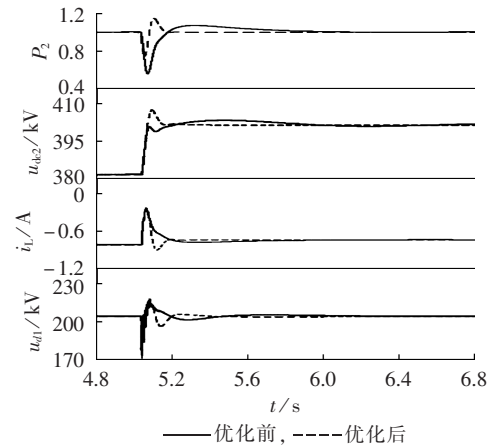


图 6 直流电压阶跃时的仿真波形
Fig.6 Simulative waveforms when DC voltage step changes

4.2.3 P_{2ref} 从 1.0 p.u. 下降到 0

为了模拟大扰动,有功功率参考值 P_{2ref} 在 $t=5$ s 从 1.0 p.u. 快速下降到 0。各物理量优化前后的响应曲线如图 7 所示。可见,优化后的有功功率、直流电压、直流电流和交流电压的响应速度变快,直流电压的振荡得到了有效抑制。

4.2.4 P_{2ref} 从 1.0 p.u. 阶跃到 -1.0 p.u.

图 8 为有功功率参考值 P_{2ref} 在 $t=5$ s 发生潮流反转,从 1.0 p.u. 阶跃到 -1.0 p.u. 时的响应曲线。可见,优化前的有功功率、直流电压、直流电流、交流电压均有较大幅度的振荡,优化后的系统迅速恢复稳定,而且超调量明显降低。

4.2.5 VSC₁ 端发生三相接地故障

图 9 为 VSC₁ 端在 $t=5$ s 发生三相接地故障,故

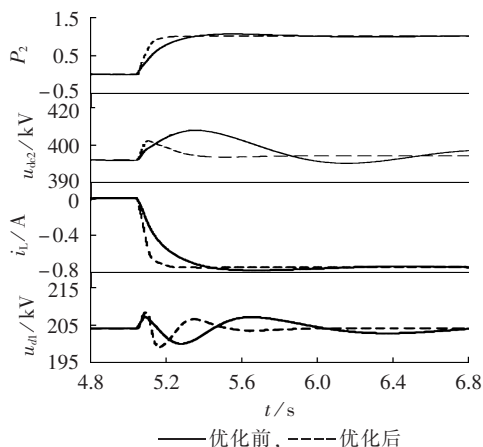


图 7 有功功率阶跃时的仿真波形

Fig.7 Simulative waveforms when active power step changes

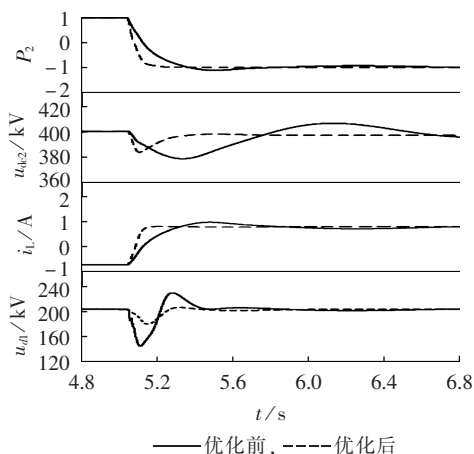
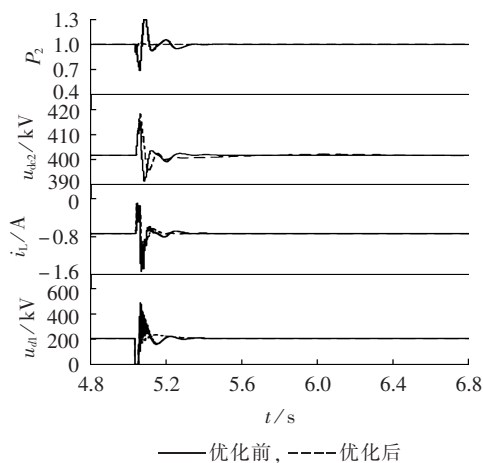


图 8 有功功率潮流反转时的仿真波形

Fig.8 Simulative waveforms when active power flow reverses

图 9 VSC₁ 发生三相接地故障时的仿真波形Fig.9 Simulative waveforms under three-phase grounding fault in VSC₁

障持续时间为 0.02 s 时的响应曲线。可见,优化后的有功功率、直流电流、直流电压、交流电压的振荡峰值降低,振荡阻尼增大,使系统能较快恢复正常运行。

5 结论

本文构建了 VSC-HVDC 系统的全局小信号模型,并基于建立的小信号模型,运用 PSO 算法对控制参数进行整体优化。在 PSCAD/EMTDC 仿真环境下对优化前后系统的稳态与暂态特性进行对比分析,得到以下结论:

a. 由于特征根是影响 VSC-HVDC 系统稳定性的直接因素,本文利用特征根分析法,建立了与系统特征根直接相关的振荡模式和衰减模式的罚函数,从而加快了系统的响应速度,降低了超调量,增大了振荡阻尼,有助于提高系统的稳定性;

b. PSO 算法能同时对整个系统的所有控制器参数进行整体优化,并能快速精准地找到适应度高的位置,仿真结果表明,不管是发生小扰动、大扰动、潮流反转还是故障情况,优化后的系统都具有较高的控制精度,系统的稳态与暂态特性均得到较大改善。

参考文献:

- [1] 张芳,李静远,李传栋. 含 VSC-HVDC 交直流混合系统机电暂态仿真研究[J]. 电力自动化设备,2016,36(2):17-24.
ZHANG Fang,LI Jingyuan,LI Chuandong. Electromechanical transient simulation of AC-DC hybrid systems containing VSC-HVDC [J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(2):17-24.
- [2] 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.
- [3] 徐政,屠卿瑞,裴鹏. 从 2010 国际大电网会议看直流输电技术的发展方向[J]. 高电压技术,2010,36(12):3070-3077.
XU Zheng,TU Qingrui,QIU Peng. New trends in HVDC technology viewed through CIGRE 2010[J]. High Voltage Engineering,2010,36(12):3070-3077.
- [4] 闫文宁,李可军,王卓迪,等. 基于附加有功信号的 VSC-MTDC 系统平衡控制策略[J]. 电力自动化设备,2016,36(2):32-39.
YAN Wenning,LI Kejun,WANG Zhuodi,et al. Strategy of balanced control based on additional active power signal for VSC-MTDC system[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(2):32-39.
- [5] ZHAO C,LU X,LI G. Parameters optimization of VSC-HVDC control system based on simplex algorithm[C]//Power Engineering Society General Meeting. Tampa,FL,USA:IEEE,2007:1-7.
- [6] WANG S,LI Gengyin,ZHOU Ming,et al. Research on interconnecting offshore wind farms based on multi-terminal VSC-HVDC [C]//2010 International Conference on Power System Technology. Hangzhou,China:[s.n.],2010:1-7.
- [7] SHI H B,LIU T Q. HVDC and STATCOM coordinate modulation damping low frequency oscillation[C]//2012 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. Shanghai,China:[s.n.],2012:1-4.
- [8] 喻锋,王西田,杨煜,等. 一种混合遗传算法在 HVDC 定电流控制器参数优化中的应用[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(9):126-131.
YU Feng,WANG Xitian,YANG Yu,et al. An application of hybrid genetic algorithm in the parameters optimization of HVDC

- constant current controller[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(9): 126-131.
- [9] 徐振宇,李树鹏,苏靖棋,等. 基于遗传模拟退火算法的 SEDC 与 SSDC 控制参数的协调优化[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 1983-1988.
- XU Zhenyu, LI Shupeng, SU Jingqi, et al. Genetic and simulated annealing algorithm based coordinated optimization of parameters of supplementary excitation damping controller with parameters of sub-synchronous oscillation damping controller[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 1983-1988.
- [10] ZHOU J Z, DING H, FAN S, et al. Impact of short-circuit ratio and phase-locked-loop parameters on the small-signal behavior of a VSC-HVDC converter[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(5): 2287-2296.
- [11] 袁艺嘉,赵成勇,苑宾,等. 弱交流电网条件下 VSC 无功类控制分析与优化[J]. 电网技术, 2016, 40(3): 696-703.
- YUAN Yijia, ZHAO Chengyong, YUAN Bin, et al. Analysis and optimization of reactive power controllers of voltage source converters in weak AC grid[J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 696-703.
- [12] 韩民晓,熊凌飞,丁辉. 利用电压倾斜控制的 VSC-MTDC 稳定性分析[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 1808-1813.
- HAN Minxiao, XIONG Lingfei, DING Hui. Stability analysis of VSC-MTDC with voltage droop control[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 1808-1813.
- [13] 杨洁,刘开培,王东旭,等. 向无源网络供电的双端柔性直流输电系统小信号稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(10): 2400-2408.
- YANG Jie, LIU Kaipei, WANG Dongxu, et al. Small signal stability analysis of VSC-HVSC applied to passive network [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(10): 2400-2408.
- [14] HASSAN H, EL-METWALLY M, EL-EMARY A, et al. Optimization of power system controller parameters using Eigen value sensitivity and linear programming[C]//2011 8th International Conference on the European Energy Market (EEM). Zagreb, Croatia: [s.n.], 2011: 489-494.
- [15] D'ARCO S, SUUL J A, FOSSO O B. Automatic tuning of cascaded controllers for power converters using eigenvalue parametric sensitivities[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(2): 1743-1753.
- [16] 王康,金宇清,甘德强,等. 电力系统小信号稳定分析与控制综述[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(5): 10-19.
- WANG Kang, JIN Yuqing, GAN Deqiang, et al. Survey of power system small signal stability and control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(5): 10-19.
- [17] 郑超,周孝信. 基于电压源换流器的高压直流输电小信号动态建模及其阻尼控制器设计[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(2): 7-12.
- ZHENG Chao, ZHOU Xiaoxin. Small signal dynamic modeling and damping controller designing for VSC based HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(2): 7-12.
- [18] 阮立煜. 基于粒子群算法的 VSC-HVDC 控制参数优化[J]. 浙江电力, 2015, 34(1): 9-13.
- RUAN Liyu. Optimization of VSC-HVDC control parameters based on particle swarm[J]. Zhejiang Electric Power, 2015, 34(1): 9-13.
- [19] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York, USA: McGraw-Hill, 1993: 474-476.
- [20] ARUNPRASANTH S, ANNAKKAGE U D, KARAWITA C, et al. Generalized frequency-domain controller tuning procedure for VSC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(2): 732-742.

作者简介:



杨佳艺

杨佳艺(1993—),女,湖北宜昌人,硕士研究生,主要研究方向为柔性直流输电(E-mail: 396145749@qq.com);

赵成勇(1964—),男,浙江丽水人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为高压直流输电(E-mail: chengyongzhao@ncepu.edu.cn);

苑宾(1988—),男,河北保定人,博士研究生,主要研究方向为柔性直流输电(E-mail: yuanbin880528@gmail.com);

李探(1989—),男,河北保定人,博士,主要研究方向为柔性直流输电(E-mail: litanb7101@126.com)。

Parameter optimization of VSC-HVDC control system based on particle swarm optimization algorithm

YANG Jiayi¹, ZHAO Chengyong¹, YUAN Bin¹, LI Tan²

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. State Power Economic Research Institute, Beijing 102209, China)

Abstract: The small signal model of VSC-HVDC(Voltage Source Converter based High Voltage Direct Current) is formulated. Based on the linear state space model, eigenvalue analysis method is employed to model the penalty function of oscillation modes and decaying modes directly related to the eigenvalues of the system as the objective function. Furthermore, PSO(Particle Swarm Optimization) algorithm based parameter optimization of VSC-HVDC control system is proposed, which can simultaneously optimize the entire controller parameters. Simulative results verify the correctness of the proposed small signal model and the higher control precision of the optimized system under the circumstances of small disturbances, large disturbances, power flow reversal, or contingencies. Consequently, both steady-state and transient characteristics of the entire system are greatly improved.

Key words: VSC-HVDC; small signal model; parameter optimization; particle swarm optimization algorithm; penalty function