

DOI: 10.7667/PSPC171189

# 基于VSC-HVDC并网的光伏电站启动控制及优化方法的研究

于小艳, 李国宁

(兰州交通大学自动化与电气工程学院, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:** 随着近年来能源危机的日益加重以及部分地区供电紧张、能源分布不合理问题, 光伏电站经VSC-HVDC(voltage source converter-high voltage direct current)并网已经成为一种迫切的需求。首先研究得出并网系统的整个启动控制过程, 并提出了定交流母线电压控制与定直流电压-功率斜率控制相结合的启动控制策略, 缓解并网系统启动时电流电压的大幅度波动对自身和电网带来的冲击。仿真结果显示, 该启动控制过程与控制策略的结合能够实现系统无冲击启动并正常进入额定工况稳定运行。随后根据光照强度随机性的特点, 提出混合粒子群算法对并网系统的控制器进行优化, 平抑光伏电站并网时的功率波动。仿真结果显示, 该算法优于单一的粒子群算法, 平抑光伏电站输出功率波动的效果更加显著。

**关键词:** 光伏电站; VSC-HVDC; 启动控制策略; 无冲击启动; 混合粒子群算法; 输出功率波动

## Research on starting control and optimization method of PV power station based on VSC-HVDC grid connection

YU Xiaoyan, LI Guoning

(School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** With the growing of energy crisis, the shortage of power supply in some areas and the unreasonable distribution of energy, it is urgent that the PV power station is connected by Voltage Source Converter-High Voltage Direct Current (VSC-HVDC). Firstly, the whole start-up control process of the grid-connected system is studied and obtained, and a start-up control strategy combining the constant AC bus voltage control with the constant DC/DC voltage-slope control is proposed to alleviate the impact on itself and the grid due to the large fluctuation of the current and voltage at the start-up of grid-connected system. The simulation results show that the combination of the start control process and control strategy can achieve the system start-up without impact and go normally into the rated operating conditions and stable operation. Then, according to the characteristics of the randomness of light intensity, a hybrid particle swarm optimization algorithm is proposed to optimize the controller of the grid-connected system and stabilize the power fluctuation when the PV power station is connected. The simulation results show that the algorithm is superior to the single particle swarm algorithm, and the effect of stabilizing the output power fluctuation of the PV power station is more remarkable.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61164010).

**Key words:** PV power station; VSC-HVDC; start control strategy; no impact start-up; hybrid particle swarm optimization; output power fluctuation

## 0 引言

近年来, 随着电压源换流器的直流输电(VSC-HVDC)技术的不断创新与发展, 使其成为能够解决输配电的有效方法之一<sup>[1-3]</sup>, 且具有传输容量大、传输距离远和控制灵活等特点, 在风力、太阳能等

可再生能源并网方面发挥着显著的作用。文献[4-7]出于提升光伏电站经VSC-HVDC并网系统在稳态及故障情况下的控制特性, 提出了控制系统的拓扑结构及控制策略, 取得了一定的研究成果。但所提出的控制策略是基于直流电容器电压已预充到系统所需稳定值, 而几乎没有涉及并网系统的详细启动过程及启动控制策略。详细的启动过程及合理的启动控制策略能够加速电容器电压的预充电过程, 缓

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(61164010)

解启动过程中电流和电压对系统的冲击,同时提升系统发生故障时对电网的后备支援能力,值得认真研究。光伏电站启动时需要借助电网励磁,当采用 VSC-HVDC 接入电网时需考虑如何顺序建立起光伏电站启动所需的交流电压;另外,为确保系统正常投运并减少启动过程中对换流站设备及交流电网的冲击,还需要研究合理的无冲击启动控制策略。本文首先研究了并网系统的运行特点和启动过程,并提出基于 VSC-HVDC 的光伏并网系统的启动控制策略,实现无冲击启动并正常进入额定工况稳态运行。

由于太阳能发电的能量来源与传统发电方式完全不同,导致光伏电站不同于传统方式下的出力情况。鉴于文献[8-11]研究的是并网系统的控制策略及变流器,几乎没有涉及如何优化并网系统的控制器,以及当考虑到光照强度的随机性时并网系统之间的相互作用。合理的优化算法能够有效抑制并网系统输出功率的波动,提高系统的可靠性,使得分布式电源得以充分利用。本文对光伏电站在随机光照强度下的输出特性进行了研究分析,采用混合粒子群和粒子群算法分别对并网系统的控制器参数进行优化,并将最终结果进行对比分析。

## 1 基于 VSC-HVDC 并网的光伏电站启动控制策略

### 1.1 并网系统模型

并网系统框图如图 1 所示,光伏电站通过直流-交流-直流的双变换后经 VSC-HVDC 输电线路并网。首先将大容量光伏电站经逆变器逆变为交流电,汇流接入交流柜,接着将交流柜出线端连接至变压器进行升压,之后送至 VSC 整流站转变成直流电,电能通过 VSC-HVDC 线路传输,最后经过 VSC 逆变站转换成交流并入电网。

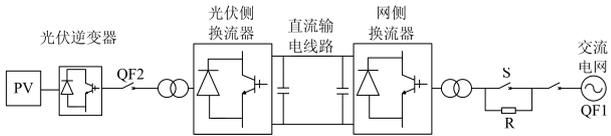


图 1 系统框图

Fig. 1 System block diagram

VSC-HVDC 系统的状态方程如式(1)<sup>[12]</sup>。

$$\begin{cases} L \frac{di_a}{dt} + Ri_a = U_{sa} - U_{ca} \\ L \frac{di_b}{dt} + Ri_b = U_{sb} - U_{cb} \\ L \frac{di_c}{dt} + Ri_c = U_{sc} - U_{cc} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$  为三相电流;  $U_{sa}$ 、 $U_{sb}$ 、 $U_{sc}$  表示光伏电站变压器三相电压;  $U_{ca}$ 、 $U_{cb}$ 、 $U_{cc}$  为换流器交流侧基波三相电压;  $R$  和  $L$  为电阻和电感。式(1)经过派克变换可得三相系统在  $dq$  两相旋转坐标系下的模型如式(2)所示。

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} + Ri_d = U_{sd} - U_{cd} + \omega Li_q \\ L \frac{di_q}{dt} + Ri_q = U_{sq} - U_{cq} + \omega Li_d \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $U_{sd}$  和  $U_{sq}$  为  $U_{sa}$ 、 $U_{sb}$ 、 $U_{sc}$  在  $dq$  旋转坐标系中的向量;  $U_{cd}$  和  $U_{cq}$  为  $U_{ca}$ 、 $U_{cb}$ 、 $U_{cc}$  在  $dq$  旋转坐标系中的向量。依据瞬时无功功率理论<sup>[12]</sup>, 在  $abc$  坐标系下的换流站和交流系统间传输的有功功率  $p_s$  以及无功功率  $q_s$  分别为

$$\begin{cases} p_s = U_{sa}i_a + U_{sb}i_b + U_{sc}i_c \\ q_s = [(U_{sa} - U_{sb})i_c + (U_{sb} - U_{sc})i_a + (U_{sc} - U_{sa})i_b] / \sqrt{3} \end{cases} \quad (3)$$

式(3)经过  $dq$  变换后,光伏电站输出的有功  $p_{PVs}$  和无功  $q_{PVs}$  分别为

$$\begin{cases} p_{PVs} = \frac{3}{2}(U_{sd}i_d + U_{sq}i_q) \\ q_{PVs} = \frac{3}{2}(U_{sd}i_q - U_{sq}i_d) \end{cases} \quad (4)$$

### 1.2 启动控制过程分析

若无其他电源设备接入的情况下,光伏系统并网后的启动过程表现出无源特性<sup>[13-14]</sup>,不能自启动,需依靠 VSC-HVDC 给其提供启动电源。故总体启动顺序应先使 VSC-HVDC 系统的网侧换流器(GSVSC)启动并入交流电网,依次建立起直流线路电压和光伏侧换流器(PVVSC)的交流电压,待 VSC-HVDC 空载启动完毕后再接入光伏系统。在启动过程中,VSC-HVDC 系统需要建立稳定的直流电压,并为光伏电站的并网提供稳定的电压,之后光伏电站在 PVVSC 所提供的电压源下完成他励启动与无冲击并网。图 1 为并网系统的整体框图, S 为充电旁路开关, QF1、QF2 为断路器。

图 2 为并网系统的启动控制过程图。VSC-HVDC 中的 GSVSC 连接于交流电网,故可采用自励充电模式,即在启动过程中利用交流电网对换流站进行不控整流充电,并由交流充电电阻来配合限制冲击电流。在启动过程中,PVVSC 的交流侧是无源的,只能采用他励充电模式,即需要通过 GSVSC 及直流线路获得充电能量。

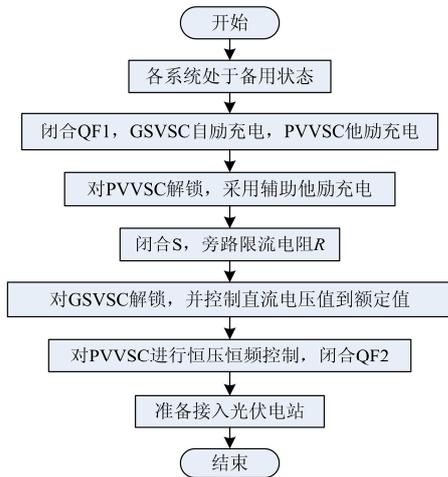


图 2 启动控制流程图

Fig. 2 Start control flow chart

本文提出相对简易的两阶段式换流站启动方式。第一阶段：先闭合 QF1，交流系统利用二极管的不控整流作用对 GSVSC 和 PVVSC 进行充电，充电完成后电容器可能发生欠压情况；第二阶段：换流站进入可控性阶段，可断开限流电阻  $R$ ，启动 GSVSC 侧的定直流电压—功率斜坡控制器；当直流电压达到额定值时，启动 PVVSC 的定交流母线电压控制器；当交流电压达到额定值后，系统满足接入光伏电站的条件。

### 1.3 并网系统控制策略的研究

VSC-HVDC 系统常用的控制技术为矢量控制<sup>[15]</sup>，即将 VSC 输出的三相交流电压和电流分别用正交同步旋转坐标系的两个分量表示和控制。本文设计出基于内环电流控制与外环功率控制相结合的矢量控制策略。

内环电流控制的传递函数<sup>[14]</sup>如式(5)所示。

$$G_1(s) = (k_p + k_i s) \frac{K_{\text{PWM}}}{1 + \frac{1}{2} T_s s} \cdot \frac{1}{1 + T_s s} \cdot \frac{1}{R + s \frac{X_L}{\omega}} \quad (5)$$

式中： $(k_p + k_i s)$  为比例积分环节； $1/(R + sX_L/\omega)$  为等效电感和电阻的传递函数。外环有功与无功的传递函数<sup>[14]</sup>如式(6)所示。

$$G_2(s) = \frac{3}{2} u_{sq} \cdot \frac{k_p + k_i s}{(1 + 3T_s s)(1 + T_s s)} \quad (6)$$

式中： $1/(1 + T_s s)$  为采样滤波环节； $1/(1 + 3T_s s)$  为电流内环的等效传递函数。

#### 1) 定交流母线电压控制策略

PVVSC 侧换流站设计了定交流母线电压控制方式进行控制。由于 PVVSC 侧的输出波动比 GSVSC 侧要大，该控制方式有利于提高 PVVSC 侧

的电压稳定性。当光伏系统正常工作时，交流母线的电压幅值、频率和相角都需要实时地监控。在直流的隔离下，会使得光伏电站交流母线电压和电网电压不同步，则可由当地控制系统直接控制交流母线频率及初相位。PVVSC 侧换流器控制系统结构图如图 3 所示， $U_{sd}^*$  和  $U_{sq}^*$  分别表示  $U_{sd}$  和  $U_{sq}$  的参考值； $U_{cd}^*$  和  $U_{cq}^*$  分别表示  $U_{cd}$  和  $U_{cq}$  的参考值； $i_d^*$  和  $i_q^*$  分别表示  $i_d$  和  $i_q$  的参考值； $U_{ca}^*$ 、 $U_{cb}^*$ 、 $U_{cc}^*$  分别为  $U_{ca}$ 、 $U_{cb}$ 、 $U_{cc}$  的参考值。

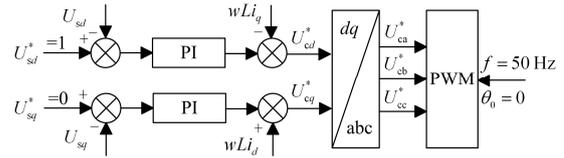


图 3 PVVSC 侧换流器控制策略结构图

Fig. 3 PVVSC converter control strategy structure

#### 2) 定直流电压—功率斜坡控制策略

GSVSC 换流器采用定直流电压—功率斜坡控制方式。该方式也称为直流电压下垂控制，通过改变斜率的设定值，对直流电压、功率、电流等参数进行调节。斜坡控制方式可使 GSVSC 侧换流器在斜坡控制模式和限流模式下运行，这两种工作模式能更快地将直流电压控制到额定值，尽量使无功功率的值为 0，并在 GSVSC 启动时刻起到抑制冲击电流的作用。如图 4 所示为 GSVSC 换流器控制策略结构图， $Q^*$  表示  $Q$  的参考值， $U_{dc}^*$  表示  $U_{dc}$  的参考值。

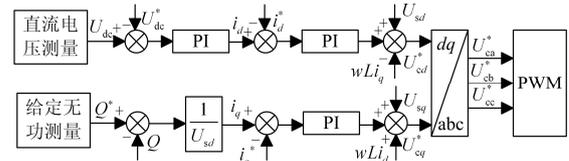


图 4 GSVSC 侧换流器控制策略结构图

Fig. 4 GSVSC converter control strategy structure

## 2 基于 VSC-HVDC 并网的光伏电站控制系统的优化方法研究

### 2.1 光伏电场分布的概率模型

光伏电场出力的大小取决于当地光照的强弱，是一个随机变量，但在一段时间里(1 小时或几小时)符合 Beta 分布<sup>[16]</sup>。光伏电场的出力与光辐射度间的关系如式(7)所示。

$$f(\gamma) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left( \frac{\gamma}{\gamma_{\max}} \right)^{\alpha-1} \left( 1 - \frac{\gamma}{\gamma_{\max}} \right)^{\beta-1} \quad (7)$$

式中： $\gamma$  表示实际光照强度； $\gamma_{\max}$  表示最大光辐射

度, 单位  $W/m^2$ ;  $\Gamma$  为 Gamma 函数。  $\alpha$  和  $\beta$  为 Beta 分布的形状参数。

## 2.2 算法分析

### 1) 粒子群算法

粒子群算法(PSO)是一种进化计算技术<sup>[17]</sup>, 假定在  $D$  维空间里, 每个粒子按照两个极值进行更新, 其中之一是在飞行过程中粒子所经历的最优位置  $P_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{id})$ , 其中个体最优解表示为  $p_{best}$ ; 另一个是群体中所有粒子经历过的最优位置  $P_g = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gd})$  相应的适应值记作  $g_{best}$ , 粒子通过式(8)来更新自己的速度和位置。

$$\begin{cases} v_{id}^{n+1} = v_{id}^n + c_1 r_1^n (p_{id}^n - x_{id}^n) + c_2 r_2^n (p_{gd}^n - x_{id}^n) \\ x_{id}^{n+1} = x_{id}^n + v_{id}^{n+1} \\ d = 1, 2, \dots, D, i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $c_1$ 、 $c_2$  表示加速常数, 为正常数;  $r_1$ 、 $r_2$  为  $[0, 1]$  的随机数;  $n = 1, 2, \dots$  表示迭代次数。

### 2) 遗传算法

遗传算法(GA)<sup>[18]</sup>是基于 Darwin 提出的进化论与 Mendel 提出的基因遗传学原理所衍生而来, 根据适者生存原则, 借助生物上的复制、交叉以及变异等步骤, 使要优化的问题逐步靠近最优解。

### 3) 混合粒子群算法

PSO 虽简单容易实现且没有较多参数的调节过程, 但全局搜索能力相对较差, 被局部的最优解所局限。而 GA 具有良好的全局搜索能力, 可更容易地进行分布式计算, 使求解速度更快。因此将遗传算法嵌于粒子群算法中, 将所有种群先进行 PSO 较小代数进化后, 只选取最优的  $M$  个粒子进行 GA 遗传操作, 可以更好地提高种群的适应度。由于在混合过程中完成两次信息传递, 可以更好、更快地获得最优解, 相比单一算法, 其收敛速度更快, 最大程度地减少并网系统输出功率的波动。

本文将所设计的混合粒子群算法运用于 VSC-HVDC 并网系统的定交流母线电压控制器和定直流电压—功率斜率控制器中, 对系统的 PI 参数进行优化。混合算法的流程如图 5 所示。

下面给出该算法的具体执行步骤:

- 1) 根据 VSC-HVDC 系统传递函数, 由传统的频率响应法得到一组初始值;
- 2) 更新 VSC-HVDC 仿真模型中的 PI 参数, 进行模型仿真并得到目标函数值;
- 3) 初始化参数的位置和速度, 并设置迭代次数  $gap=0$ ;
- 4) 按式(8)更新参数的速度和位置, 计算它们的

适应度值, 并搜索参数的个体最优解  $P_i$  及全局最优解  $P_g$ ;

5) 判断如果满足终止条件则输出最优解, 终止程序, 否则继续下一步;

6) 按适应度值随机选出  $M$  个参数, 对它们进行交叉操作, 得到  $M$  个新个体;

7) 对所有  $M+N$  个参数进行变异操作, 从中选择适应度强的  $N$  个参数进入下一代, 转 2)。

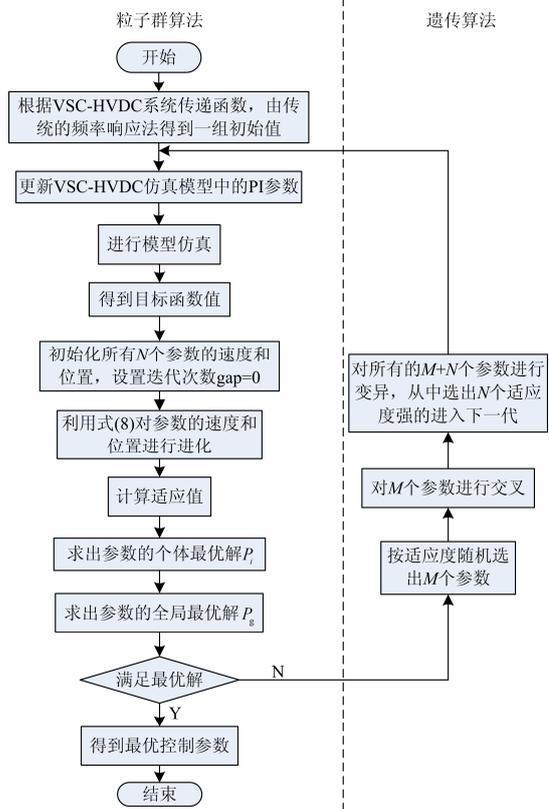


图 5 混合算法流程图

Fig. 5 Mixed algorithm flow chart

## 3 仿真分析

### 3.1 模型参数设置

为了验证上文提出的启动控制策略的有效性及其混合粒子群算法较好的优化特性, 在 Matlab/Simulink 中搭建了如图 1 所示的系统模型, PVVSC 和 GSVSC 侧换流器都选用两电平结构, 且两侧换流站参数基本相同, 如表 1 所示。

### 3.2 启动控制的仿真与分析

首先按 1.3 节启动控制策略对 VSC-HVDC 并网系统的启动过程进行仿真, 得出系统启动时 PVVSC 与 GSVSC 侧换流站的电容电压、VSC 系统的直流电压与 PVVSC 交流侧电流电压, 仿真波形如图 6 所示。

表 1 系统参数

Table 1 System parameters

参数	设置值
光伏电站额定容量/MW	100
光伏电站母线额定电压/kV	35
额定直流电压/kV	±320
换流站额定容量/MW	100
换流站交流侧额定电压/kV	330
换流站交流母线电压/kV	330
频率/Hz	50
直流电缆长度/km	100
架空线长度/km	200
直流电容器 $C/\mu\text{F}$	80
电抗值/p.u.	0.15
光照强度/( $\text{W}/\text{m}^2$ )	800

仿真时设置启动时间  $t=0.1\text{s}$ , 电压预设值  $u_{\text{set}}=1\text{p.u.}$ ,  $q_{\text{ref}}=0$ , 断开  $S_2$ 。当  $t=0.1\text{s}$  时,  $S_1$  闭合, 启动开始, GSVSC 侧换流站从交流侧进行自励充电, PVVSC 侧换流站从直流侧进行他励充电, 直流电压逐渐增大, 若不加入控制策略则只能达到  $0.65\text{p.u.}$ ; 随着 PVVSC 侧电容电压值的上升, 直流电压达到第一阶段的稳定值, 同时 PVVSC 侧的电容电压值与 GSVSC 侧的电容电压值一致且处于稳定状态, 而在  $t=0.2\text{s}$  时, PVVSC 侧解锁采用辅助他励充电, 造成系统直流电压波动出现下降尖峰, 稍后快速恢复; 当  $t=0.4\text{s}$  时, GSVSC 侧的控制器启动, 两侧 VSC 的电容电压值与直流电压值均保持一致, 并且都满足额定值要求; 当  $t=0.6\text{s}$  时, 启动 PVVSC 侧控制器, PVVSC 交流侧电压最终也达到额定值。这时启动结束, 光伏电站已满足启动并网的条件。从图 6(d)、图 6(e)可以看出, 启动初期以及启动 PVVSC 侧控制器时, 充电电流  $i_{\text{ac}}$  全部都被局限在低于额定值之内。由于充电时高通滤波器的工作, 注入 VSC 系统的电流不会为零。启动 PVVSC 侧控制器时, 刚开始波动较大, 但由于系统设置了启动控制策略, 使交流电压  $u_{\text{ac}}$  很快达到额定值, 对交流系统的冲击也很小。

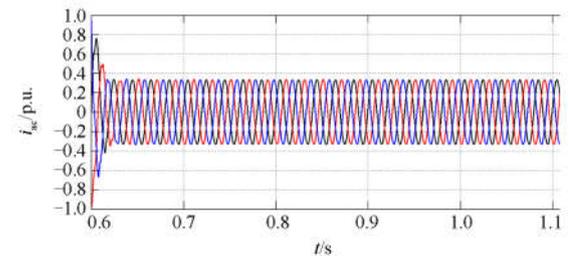
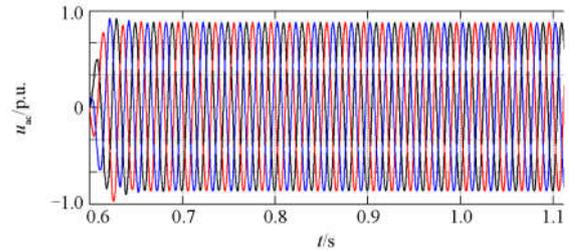
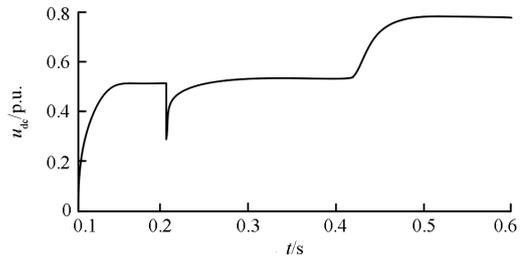
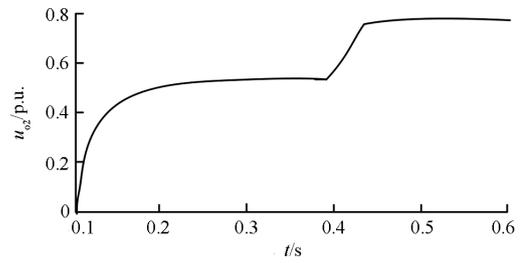
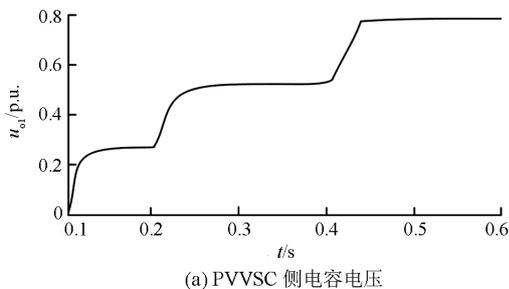


图 6 VSC-HVDC 系统启动过程

Fig. 6 VSC-HVDC system startup process

### 3.3 并网时的仿真与分析

当 VSC 系统启动完毕后,  $t=2\text{s}$  时启动光伏电站, 此时光伏输出功率逐步达到额定值, PVVSC 和 GSVSC 交流侧电压均稳定, 电流最终也达到额定值, 图 7 为并网时的仿真波形。从图 7(b)、图 7(d) 得到, GSVSC 侧的交流电压几乎没有波动, 要稳定于 PVVSC 侧的交流电压。从图 7(c)、图 7(e) 可以看出, PVVSC 侧电流刚开始波动较大, 但  $2.5\text{s}$  后逐渐恢复正常慢慢地达到额定值, 而 GSVSC 侧的交流电流要稳定于 PVVSC 侧的交流电流, 说明 VSC-HVDC 系统起到稳定电压和电流的作用。

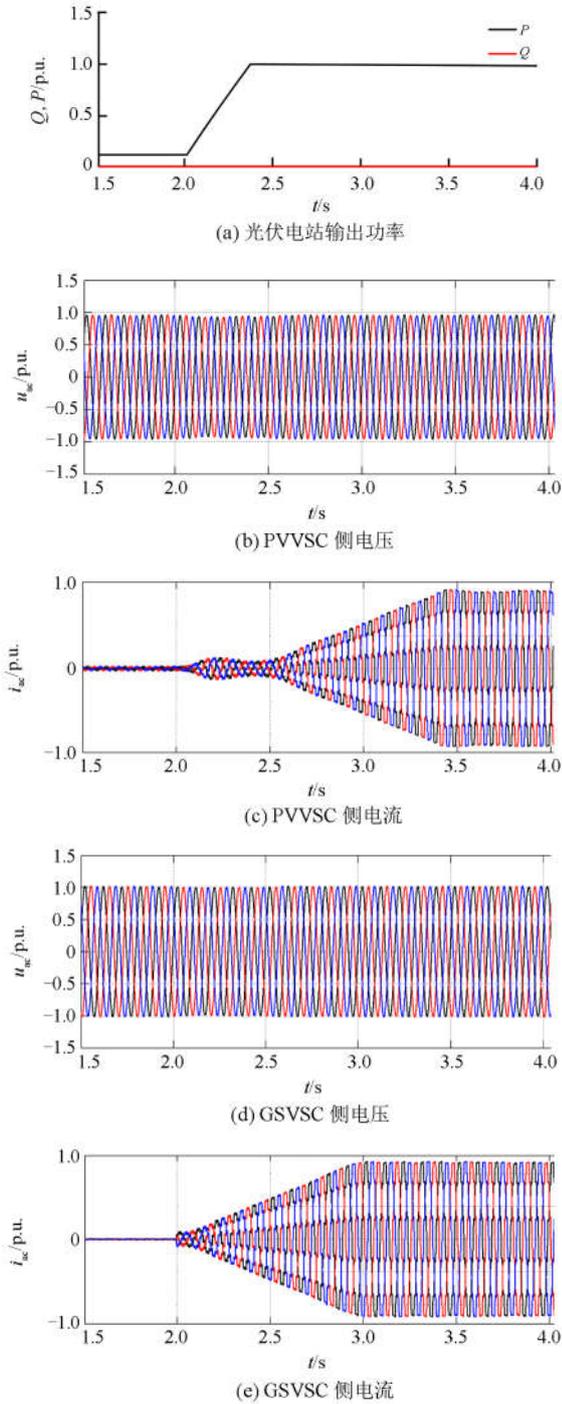


图 7 基于 VSC-HVDC 并网时的波形

Fig. 7 Waveform based on VSC-HVDC grid connection

### 3.4 并网控制系统的优化仿真

#### 1) 目标函数设置

ITAE(时间乘绝对误差积分)是用于评估控制系统动态响应的一种误差积分准则<sup>[19]</sup>, 依据 ITAE 最小化准则设置本系统的目标函数如式(9)。

$$J_{ITAE} = \int_0^{t_s} t |e_{P\_PV}| dt + \int_0^{t_s} t |e_{P\_GS}| dt + \int_0^{t_s} t |e_{U_{dc}}| dt \quad (9)$$

式中:  $t_s$  为动态过程时间;  $e_{P\_PV}$  表示光伏电站 PVVSC 侧有功功率参考值和测量值间的差值;  $e_{P\_GS}$  表示 GSVSC 侧有功功率参考值和测量值间的差值;  $e_{U_{dc}}$  表示直流侧的电压参考值与测量值间的差值。该目标函数综合考虑到功率跟踪误差与调节时间, 起到抑制稳态误差的作用, 因此可作为并网系统优化的选择指标。

#### 2) 算例分析

为了验证本文所设计的基于 VSC-HVDC 并网的光伏系统控制器参数优化方法的有效性, 利用 Matlab 软件对系统进行仿真分析, 仿真参数值如表 1。算法所设计参数为: 群体规模为 100, 交叉率为 0.8, 变异率为 0.1, 选择方式为随机选择, 以 40 代作为收敛依据。

从图 8 可以看出, 柔性直流输电输送功率在趋势上跟随太阳辐照度变化。但因为光照强度的波动较大, 致使能量来源的不稳定性加剧, 使得光伏电站的输出波动幅度较大。本文所要做的就是提出有效的方法减少并网系统在光照强度随机波动的条件下的功率波动。

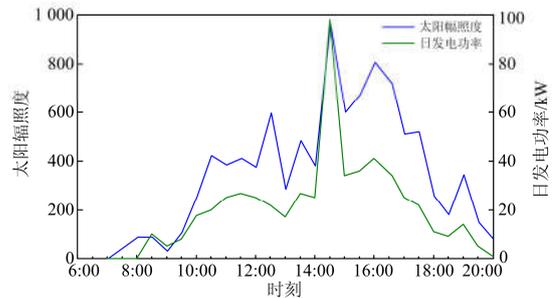


图 8 光伏出力功率与光照强度对比

Fig. 8 Comparison of photovoltaic power and light intensity

从图 9 得出, 当系统处于启动阶段时, 从响应速度上可以看出, 混合粒子群算法优化效果好于粒子群算法的优化效果。混合粒子群算法的最大超调量  $\sigma_2=145.54$ , 其值小于系统初始条件下的最大超调量  $\sigma_0=191.63$ 。而粒子群算法由于响应速度过慢, 导致  $\sigma_1=0$ 。在达到额定功率的时间上, 混合粒子群算法在  $t=0.46$  s 就已经达到 100 MW, 而粒子群算法在  $t=0.75$  s 之后才达到光伏电站的额定输出功率。在  $t=1\sim 2$  s 时, PVVSC 侧控制器初始参数的有功功率标准差为 26.31; 粒子群算法和混合粒子群算法的有功功率标准差分别为 11.45 和 8.35, 总结如表 2 所示。

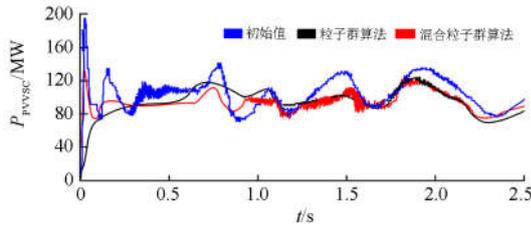


图 9 PVVSC 侧有功功率

Fig. 9 PVVSC side active power

表 2 PVVSC 侧各项指标

Table 2 PVVSC side of the indicators

	初始值	粒子群算法	混合粒子群算法
超调量 $\sigma$	191.63	0	145.45
达到额定功率 的时间/s	0.87	0.75	0.46
标准差	26.31	11.45	8.35

由于 GSVSC 侧控制器控制 VSC 的直流侧电压, 所以当并网系统处于启动初期时, 交流侧会向直流侧输送大量的有功功率, 如图 10 所示。GSVSC 侧控制器在初始条件下的反向功率为 257.27 MW。

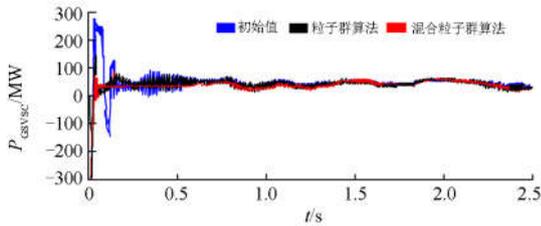


图 10 GSVSC 侧有功功率

Fig. 10 GSVSC side active power

由图 10 得出, 当系统处于启动阶段时, 控制器采用混合粒子群算法优化后的响应与粒子群算法类似, 但系统的稳态误差要比粒子群算法的小。当  $t=1\sim 2$  s 时, GSVSC 侧控制器初始参数有功功率的标准差为 10.67; 粒子群算法和混合粒子群算法的有功功率标准差分别为 7.71 和 5.95。

由图 9、图 10 和表 2 可以看出, 混合粒子群算法优化后的控制器各项指标要明显优于粒子群算法与初始值的各项指标。

#### 4 结论

本文首先提出了基于 VSC-HVDC 并网的光伏启动控制策略, 然后根据光照强度随机性的特点提出混合粒子群优化算法对其整个并网系统的控制器进行优化, 通过仿真结果可以得出如下结论:

1) 针对基于 VSC-HVDC 并网的光伏系统, 本文研究得出并网系统的启动过程, 并提出有效可行的控制策略, 不仅限制了启动阶段的充电电流, 减小对系统的冲击, 而且还能较快地升高直流电压达到额定值。经 Matlab 仿真试验, 结果表明该控制策略能够起到平稳启动及可靠并网的作用, 具有一定的工程应用价值。

2) 在光照强度大幅变化的情况下, 利用混合粒子群算法优化后的控制系统更有效地降低了光伏电站输出功率的大幅波动对并网系统功率的影响。仿真结果显示混合粒子群算法优于粒子群算法, 使得光伏发电并网功率变得更加平滑稳定, 不仅满足电网的并网准则, 还能充分利用太阳能解决部分地区供电紧张、分布不合理等问题。

#### 参考文献

- [1] It's time to connect-technical description of HVDC light technology[R]. ABB, 2006.
- [2] 黄晟, 王辉, 廖武, 等. 基于 VSC-HVDC 串并联拓扑结构风电场协调控制策略研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(23): 155-162.  
HUANG Wei, WANG Hui, LIAO Wu, et al. The coordinated control strategy based on VSC-HVDC series-parallel topology in wind farm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(23): 155-162.
- [3] 夏俊丽, 毛荀, 柯德平, 等. 基于综合评价的交、直流输电适用范围研究[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(3): 120-126, 139.  
XIA Junli, MAO Xun, KE Deping, et al. Applicable scope of AC and DC power transmission based on comprehensive evaluation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(3): 120-126, 139.
- [4] 罗宇强, 谭建成, 董国庆. 级联式光伏电站直流并网拓扑及其控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(13): 14-19.  
LUO Yuqiang, TAN Jiancheng, DONG Guoqing. Topology of direct-current connecting cascaded photo-voltaic power station to power grid and its control strategy[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(13): 14-19.
- [5] 王岩, 魏林君, 高峰, 等. 光伏电站经柔性直流集电送出系统的低电压穿越协调控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(14): 70-78.  
WANG Yan, WEI Linjun, GAO Feng, et al. Coordinated control strategy between large-scale photovoltaic power station and VSC-HVDC for low voltage ride-through operation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(14): 70-78.

[6] ZENI L, ERIKSSON R, GOUMALATSOS S, et al. Power oscillation damping from VSC-HVDC connected offshore wind power plants[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(2): 829-838.

[7] 赵伟然, 李光辉, 何国庆, 等. 光伏电站经 VSC-HVDC 并网拓扑及其控制策略[J]. 电网技术, 2012, 36(11): 41-45.  
ZHAO Weiran, LI Guanghui, HE Guoqing, et al. Topology of connecting photovoltaic power station to power grid via VSC-HVDC and its control strategy[J]. Power System Technology, 2012, 36(11): 41-45.

[8] WANG L Y, ERTUGRUL N. Selection of PI compensator parameters for VSC-HVDC system using decoupled control strategy[C] // 20th Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), December 5-8, 2010, Christchurch, New Zealand: 1-7.

[9] 冯明, 李兴源, 李宽, 等. 多端柔性直流输电系统启动控制及其仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(14): 60-65.  
FENG Ming, LI Xingyuan, LI Kuan, et al. Control and simulation of VSC-HVDC start-up procedure[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(14): 60-65.

[10] 蔡永梁, 任成林, 周竞宇, 等. 基于 MMC 的柔性直流输电电容电压波动抑制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(5): 45-50.  
CAI Yongliang, REN Chenglin, ZHOU Jingyu, et al. Control strategy for suppressing capacitor voltage ripple of MMC-HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(5): 45-50.

[11] 鞠昌斌, 王环, 冯伟, 等. 应用于柔性直流电网的光伏直流并网变流器研究[J]. 可再生能源, 2014, 32(9): 1274-1280.  
JU Changbin, WANG Huan, FENG Wei, et al. Research of photovoltaic DC grid-connected converter applied in flexible DC grid[J]. Renewable Energy Resources, 2014, 32(9): 1274-1280.

[12] 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: 132-144.

[13] 刘璇, 李琦, 乐波. DFIG 风场并网柔直系统的启动策略研究[J]. 电力电子技术, 2016, 50(11): 39-41.  
LIU Xuan, LI Qi, YUE Bo. Starting-up control strategy of HVDC system for integrating DFIG-based wind farm[J]. Power Electronics, 2016, 50(11): 39-41.

[14] 楚遵方, 李耀华, 王平, 等. 柔性直流输电系统中模块化多电平变流器的直流侧充电策略分析[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 136-142.  
CHU Zunfang, LI Yaohua, WANG Ping, et al. Analysis of charging strategy by DC grid of modular multilevel converter in high voltage direct current transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 136-142.

[15] BRUNNER C. IEC 61850 and the PSR committee protection[C] // Automation and Control (PAC) World Magazine, 2010(3): 25.

[16] 王敏. 分布式电源的概率建模及其对电力系统的影响[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2010.  
WANG Min. The probabilistic modeling of distributed generation and its influences on power systems[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2010.

[17] 张利彪, 周春光, 刘小华, 等. 粒子群算法在求解优化问题中的应用[J]. 吉林大学学报, 2005, 23(4): 385-389.  
ZHANG Libiao, ZHOU Chunguang, LIU Xiaohua, et al. Application of particle swarm optimization in solving optimization problems[J]. Journal of Jilin University, 2005, 23(4): 385-389.

[18] 崔静思, 高凯, 韩子娇, 等. 基于遗传算法的 VSC-HVDC 控制系统 PI 参数优化[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(2): 26-31.  
CUI Jingsi, GAO Kai, HAN Zijiao, et al. Control system PI parameter optimization based on genetic algorithm for VSC-HVDC[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(2): 26-31.

[19] 徐峰, 李东海, 薛亚丽. 基于 ITAE 指标的 PID 参数整定方法比较研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 206-210.  
XU Feng, LI Donghai, XUE Yali. Comparing and optimum seeking of PID tuning methods based on ITAE index[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(8): 206-210.

收稿日期: 2017-08-08; 修回日期: 2017-10-05

作者简介:

于小艳(1991—), 女, 硕士研究生, 研究方向为柔性直流输电与分布式电源; E-mail: 1243125808@qq.com

李国宁(1959—), 男, 副教授, 研究方向为电力系统运行分析与控制。E-mail: 372514424@qq.com

(编辑 魏小丽)