

# 基于改进下垂控制关键负载电压实时稳定的电力弹簧控制\*

方 乐, 周建萍, 茅大钧, 张 健, 葛祥一, 叶剑桥  
(上海电力大学 自动化工程学院, 上海 200090)

**摘 要:** 针对新能源并网发电引起的间歇性问题, 电力弹簧(ES)的提出可有效改善关键负载(CL)电能质量。当电网电压不平衡与线路阻抗阻性较大存在控制耦合时, 单相多 ES 采用传统下垂控制无法获取稳定的电压和频率, 因而需要实时修正参数的改进下垂控制策略。首先利用二阶广义积分发生器构造虚拟的正交电压和电流信号完成单相  $dq$  旋转坐标变换, 进而提出用优化粒子群算法(PSO)实时改进下垂系数; PSO 模块检测各 CL 两端电压不平衡度信息并生成状态变量矩阵, 同时下垂控制模块实时采集线路信息并在每个周期更新时将其输入到 PSO 模块来优化电压偏差, 其优化结果反馈到下垂参数并实时更新。最后, 通过软件仿真对比传统下垂控制策略和改进下垂控制策略, 验证了所提控制策略的有效性。

**关键词:** 改进下垂控制; 多电力弹簧; 粒子群算法; 状态变量矩阵; 电压实时稳定性

**中图分类号:** TM 712 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2020)09-0084-07

**doi:** 10.12177/emca.2020.072

## Electric Spring Control Based on Improved Droop Control for Real-Time Stability of Critical Load Voltage\*

FANG Le, ZHOU Jianping, MAO Dajun, ZHANG Jian, GE Xiangyi, YE Jianqiao  
(School of Automation Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

**Abstract:** The electric spring (ES) can effectively improve the critical load (CL) power quality in view of the intermittent problems caused by new energy grid-connected power generation. When the grid voltage imbalance and line impedance resistance are large, there is control coupling. In this case, single-phase multi-ES cannot obtain stable voltage and frequency by traditional droop control. Therefore, it needs the droop control strategy with real-time correction of droop parameters. The second-order generalized integral generator is used to construct the virtual quadrature voltage and current signals to complete the single-phase  $dq$  rotational coordinate transformation. Then the optimized particle swarm optimization (PSO) is used to improve the droop coefficient in real time by detecting the voltage across the CL, collecting the balance information, and generating the state variable matrix. At the same time, the droop control module collects the circuit information in real time and inputs it to the PSO module to optimize the voltage deviation when each cycle is updated. The optimization result is fed back to the droop parameters for real-time update. Finally, the effectiveness of the proposed control strategy is verified by software simulation through comparing the traditional and the improved droop control strategies.

**Key words:** improved droop control; multi-electric spring; particle swarm optimization; state variable matrix; voltage real-time stability

收稿日期: 2020-04-19; 收到修改稿日期: 2020-06-04

\* 基金项目: 国家自然科学基金项目(61275038); 上海市“科技创新行动计划”地方院校能力建设专项项目(19020500700)

作者简介: 方 乐(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为交流微电网与电力弹簧控制。

周建萍(1978—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为分布式发电与微电网技术。

## 0 引言

随着光伏、风电等可再生能源(RES)的发电比例越来越高,预计到2020年在中国的占比将达到20%<sup>[1]</sup>。但大面积的RES接入主网或接入配网<sup>[2-3]</sup>,其新能源发电自身的间歇性和非连续性等对于电网的电能质量和安全稳定等都有一些负面影响,比如电压发生波动,冲击电流和谐波的产生等。2012年香港大学Hui团队<sup>[4]</sup>根据机械弹簧的性质,创造性的提出了电力弹簧(ES)的概念,并将其引入到电力系统中,形成了需求侧管理模式,使电力需求跟随电力供应进而达到供需平衡。ES的有效运行范围受到直流侧电压和非关键负载(NCL)电压的影响<sup>[5]</sup>,在有效范围内ES能根据控制需要输出适当的电压,进而实现控制目标。实现关键负载(CL)电压的稳定有两方面:(1)通过调节ES输出电压可直接提供有功功率和无功功率的补偿;(2)NCL的损耗与ES输出电压有关,通过调节ES输出电压可以间接补偿系统的有功功率和无功功率,从而达到系统功率供需平衡、CL功率稳定和改善系统电能质量的目的。

ES具有控制灵活、即插即用的外在特性。文献[6]根据线路压降与线路距离成正比特性,多ES并联协调运行通过下垂控制控制各自CL,并将其维持在电压目标值附近,仿真和试验表明,所提方法能够稳定各节点的电压而且各ES之间互不影响,但下垂系数为固定值,适应性差。文献[7]研究在孤岛微网中将一致性控制用于多ES的协调控制,来调节CL电压和无功功率分布。在电压调节和无功功率分布方面,一致性控制策略要优于传统下垂控制,但通信延时<sup>[8]</sup>限制了其广泛应用。文献[9]ES采用一致性控制,对微网本地的电压和系统频率进行调节,并且多ES的即插即用功能首次在一致性控制中得到验证,同时指出了下垂控制和一致性控制是相辅相成的,但其下垂系数仍为常值,控制精度低,实时性差。文献[10-11]提出利用下垂控制中 $f-P/V-Q$ 的比例关系同时稳定CL电压和频率,避免引入外来谐波且提高了系统的鲁棒性。文献[12]将粒子群算法(PSO)用于检测CL两端电压的不平衡度信息,实时优化与NCL串联的ES电压的脉宽调制(PWM)控制信号。但面对更大含量谐波

干扰效率仍然较低,并且没有将抑制谐波和电网电压不平衡控制目标结合在智能算法的同一优化函数中。文献[13]指出RES发电引起系统电压频率波动问题,将改进人工鱼群算法用于检测电压、频率状态量并最小化其偏差量,但面对大面积的新能源发电,其有效性仍然较低。

综上所述,目前有较少文献解决电网电压不平衡下CL电压不稳定时,通过采用PSO算法改进下垂控制的多ES协调控制问题。本文首先采用单相交流下单个ES-2<sup>[14-16]</sup>的离散PID控制,模拟电压不平衡下单个ES的稳压控制;在多ES系统控制中,针对单相交流的特殊情况,构造虚拟正交分量同时引入优化PSO算法实时改进下垂控制来消除电压不平衡下及线路阻性较大对系统的影响,具体如下:在运行时将智能负载(SL)并联的CL电压和频率不平衡度等线路参数输给PSO模块优化,实时最小化各关键节点电压、频率至目标值,并将优化结果反馈到下垂控制模块。该控制方法无需ES间通信协调控制,控制结构简单,稳定了系统电压、频率。

## 1 单相ES-2运行模式及控制策略

图1为第二代ES拓扑结构。

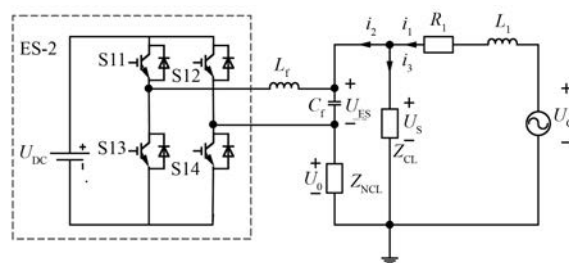


图1 第二代ES拓扑结构

图1中, $U_{DC}$ 为双向直流电压源, $L_f$ 、 $C_f$ 为滤波电感和电容, $U_{ES}$ 为ES输出电压, $i_3$ 为CL流过的电流, $U_{ES}$ 与 $i_3$ 构成的相量关系使ES既可以提供有功功率也可以提供无功功率, $L_f$ 、 $C_f$ 滤除系统中的高频分量。ES实时检测CL电压,当CL $Z_{CL}$ 电压 $U_s = U_0 = U_{s-ref}$ 时,ES为平衡状态,ES不工作相当于短路, $U_{ES} = 0$ ;若 $U_s = U_0 \leq U_{s-ref}$ ,ES调节CL电压 $U_s$ 至 $U_{s-ref}$ ,此时 $U_{ES} > 0$ ,ES功率因素角大于零,根据公式 $P = U_{ES} I_2 \cos \phi > 0$ ,ES在感性模式;若 $U_s = U_0 > U_{s-ref}$ ,为了使CL电压 $U_s$ 调至

$U_{s-ref}$ , 则  $U_{ES} < 0$ , ES 功率因素角小于零,  $P < 0$ , ES 在容性模式。

## 2 基于 SOGI 的正交信号发生器

$dq$  模型广泛应用于三相系统的系统模型, 三相系统的电压、电流经坐标旋转变换后, 系统的电压、电流正弦变量可转换为直流变量, 交流变换器在某种程度上是一种特殊的直流变换器。 $dq$  变换至少需要 2 个振幅相等, 相位相差  $90^\circ$  的正交状态分量, 故可构建一个虚拟正交分量自由度来实现从三相静止坐标系到两相静止坐标的转换。

设系统 PCC 点电压为

$$u_\alpha = U_m \cos(\omega t + \delta) \quad (1)$$

式中:  $U_m$  为 PCC 点电压幅值;  $\omega$  为电压角频率;  $\delta$  为初始相位。

则虚构的电压正交分量为

$$u_\beta = U_m \sin(\omega t + \delta) \quad (2)$$

电压相量  $\dot{U}$  形式为

$$\dot{U} = U_m \cos(\omega t + \delta) + j U_m \sin(\omega t + \delta) = u_\alpha + j u_\beta \quad (3)$$

将两相静止坐标系  $\alpha$  轴沿参考电压相量 PCC 放置, 正交分量  $u_\alpha, u_\beta$  在两相静止坐标系  $\alpha\beta$  下构成适量  $u_{\alpha\beta}$ , 表达式为

$$u_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_m \cos(\omega t + \delta) \\ U_m \sin(\omega t + \delta) \end{bmatrix} \quad (4)$$

再将合成矢量矩阵经坐标旋转变换, 得到旋转坐标系下的合成矢量  $u_{dq}$ , 表达式为

$$u_{dq} = \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = T \cdot \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_m \cos \delta \\ U_m \sin \delta \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$T = \begin{bmatrix} \cos \omega t & \sin \omega t \\ -\sin \omega t & \cos \omega t \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中:  $T$  为 Park 旋转变换矩阵。

正交信号的实现通常会用到延迟缓冲器, 或者运用一阶全通滤波器, 由于其结构简单并不能有效滤除输入信号的谐波成分, 但滤波效率和实时性有待进一步提高, 由此提出一种基于二阶广义积分(SOGI)的正交信号发生器, 检测基波正序电流的同时产生正交信号。

基于 SOGI 的正交信号发生器结构图如图 2 所示。

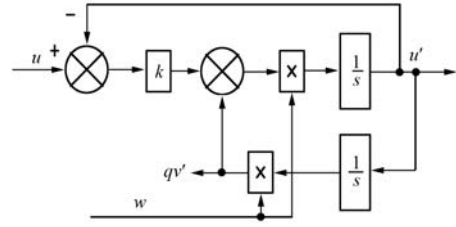


图 2 基于 SOGI 的正交信号发生器结构图

同向输出和正交输出传递函数为

$$D(s) = \frac{v'(s)}{v(s)} = \frac{k\omega s}{s^2 + k\omega s + \omega^2} \quad (7)$$

$$Q(s) = \frac{qv'(s)}{v(s)} = \frac{k\omega^2}{s^2 + k\omega s + \omega^2} \quad (8)$$

令  $s = j\omega$ , 可得  $|D(s)| = |Q(s)|$ ,  $\angle Q = \angle D - \frac{\pi}{2}$ , 与  $\omega, k$  的取值无关, 故  $D(s)$  与  $Q(s)$  是一组相互正交的信号。

由经典功率理论知识可得 PCC 点注入的有功功率和无功率分别为

$$\begin{cases} P_{inj} = u_d i_d + u_q i_q = U_m I_m \cos \delta \\ Q_{inj} = u_q i_d - u_d i_q = U_m I_m \sin \delta \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $u_d, u_q$  分别为 PCC 点电压  $d$  轴、 $q$  轴分量;  $i_d, i_q$  分别为注入 PCC 点电流  $d$  轴、 $q$  轴分量;  $I_m$  为电流幅值。

## 3 基于改进下垂控制多 ES 稳压控制策略

### 3.1 单相交流系统下垂控制

各逆变器单元分别接各自线路阻抗, 通过调节逆变器输出电压的频率(相位)和幅值, 可以分别控制其输出的有功功率和无功率, 从而调节 PCC 点电压和相位, 交流系统的下垂结构如图 3 所示。图 3 中,  $\omega_L$  为逆变器输出电压参考角频率,  $\omega_0$  为 PCC 点电压额定角频率,  $P_n, Q_n$  分别为逆变器输出有功功率和无功率;  $Z$  为线路阻抗;  $E, U_L$  逆变器端电压和参考电压。当线路阻抗近似为纯感性时,  $\theta_n = 90^\circ$ ,  $\phi_n$  很小, 可以进一步简化如下:

$$\begin{cases} P = \frac{E_n U_L \phi_n}{Z} \\ Q = \frac{U_L (E_n - U_L)}{Z} \end{cases} \quad (10)$$

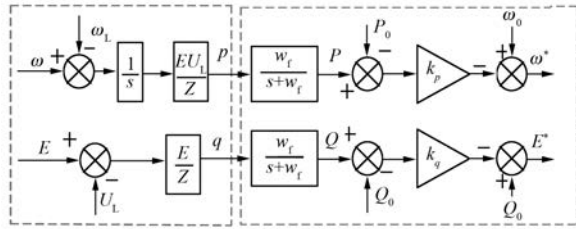


图3 下垂控制结构图

### 3.2 引入优化 PSO 算法

ES 控制策略的目的是保证 CL 电压稳定,在此基础上本文提出一种基于引入 PSO 算法改进下垂控制的实时优化控制策略来消除非线性负载引起 CL ( $i=1,2,3$ ) 两端电压不平衡,进一步提高 CL 两端的电能质量;利用改进 PSO 算法处理非线性问题的优势和快速寻优特性将系统运行中的各项偏差在线优化,实时检测 CL 电压的不平衡度并通过 ES 控制信号进行优化下垂系数  $m_i$ 、 $n_i$  ( $i=1,2,3$ ),从而达到维持各节点电压、频率的目的,也相应提高 ES 有效运行范围,整体系统控制结构图如图 4 所示。

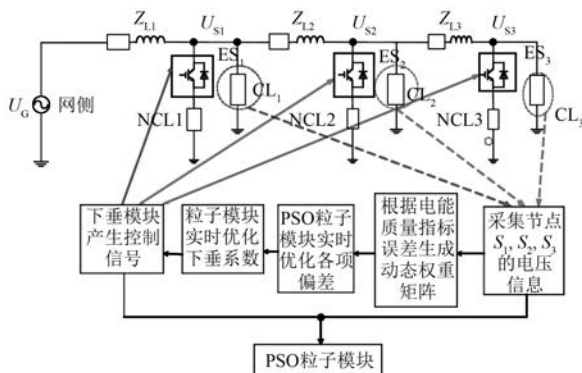


图4 多ES控制系统结构图

PSO 是一种进化计算技术,源于对鸟类捕食行为的研究,其基本思想是通过群体中个体之间的协作和信息共享来寻找最优解。其  $N$  维速度和位置更新如下:

$$V_i^{k+1} = wV_i^k + c_1 \cdot r_{d1} (Y_i^k - X_i^k) + c_2 \cdot r_{d2} (X_{pg}^k - X_i^k) \quad i=1, \dots, N \quad (11)$$

$$X_i^{k+1} = X_i^k + V_i^{k+1} \quad (12)$$

式中:  $V$  和  $X$  分别为粒子的速度和位置;  $Y_i^k$  和  $X_{pg}^k$  为当前粒子和整个群体的最优值;  $w$  为惯性因子,常取为 0.5;  $c_1$  和  $c_2$  为常数预设,为了保持搜索的

收敛性取 1.5;  $r_{d1}$  和  $r_{d2}$  是  $[0,1]$  的随机数。

算法模块包括:采集  $t$  时刻节点电压  $u_{S1}$  幅值和相角,节点电压  $u_{S2}$  幅值和相角,节点电压  $u_{S3}$  幅值和相角,针对网侧电压引起的电压不平衡度  $V_i = \frac{\Delta U_i}{U_{ref}} = \frac{U_i - U_{ref}}{U_{ref}}$  ( $i=1,2,3$ ) 问题,分别与各关键节点参考电压矢量作差值得到非线性偏差量,同时各自的节点电压偏差 ( $i=1,2,3$ ) 分别作为粒子群的寻优模块输入量(作为适应度函数输入量);针对系统频率偏移的问题,用 PLL 采样节点  $S_1, S_2, S_3$  点处频率信息作为频率基准,经过与频率参考值 50 Hz 比较后将差值  $\Delta f_{Si}$  ( $i=1,2,3$ ) 作为 PSO 算法模块的输入量。

ES 的有效运行范围受到直流测电压  $u_{DC}$  和 NCL 电压  $U_{NCL}$  的影响,为了同时保证 NCL ( $i=1,2,3$ ) 电能质量合理要求,故将实时采集 NCL 两端电压,输入到 PSO 模块中为其设定上下阈值 (5%),同时采样流入支路电流并计算出 NCL ( $i=1,2,3$ ) 消耗的有功  $P_i$  ( $i=1,2,3$ ) 和无功  $Q_i$  ( $i=1,2,3$ ),利用 PSO 算法在 NCL 电压范围内提高功率因素,从而提高其工作效率。同时,为了加快算法的响应精度和快速收敛性,根据各偏差模块的不平衡度模拟试验出各自的动态权重,每次优化模块采集到的微电网状态量的偏差程度动态地决定了各偏差项的占比。即采用线性分段衡量微电网运行过程中的状态量偏差大小,并对不同的偏差度施加不同强度的控制,数值大的状态量误差控制优先级最高,不平衡度高的模块相对赋予较高数量级的权重系数,且权重取值与不平衡度大小成正相关。根据电路理论知识节点可得随着输电线路的降低,各节点电压幅值逐渐降低的结论,符合电压的分配与线路阻抗成正比特性。

由上述指标和权重取值得到 PSO 的适应度函数为

$$H(t) = W(t) \cdot |U(t)| \quad (13)$$

其中,  $W(t)$  是动态权重矩阵,  $W(t) = [\alpha \quad \beta \quad \gamma \quad \theta \quad \delta]^T$ ,  $U(t) = [\Delta U_1 \quad \Delta U_2 \quad \Delta U_3 \quad \Delta f_i \quad \cos \theta_i]$  是偏差矩阵,权重矩阵中的变量  $\alpha, \beta, \gamma, \theta, \delta$  分别对应为  $U(t)$  中各偏差中的动态系数,首次更新时将  $W(t)$  初值设为  $[3 \quad 2 \quad 1 \quad 0.5]^T$ ,并初始化  $ES_i$  ( $i=1,2,3$ ) 中的下垂系数  $m_i, n_i$  ( $i=1,2,3$ )。

PSO 算法优化下垂系数流程图如图 5 所示。

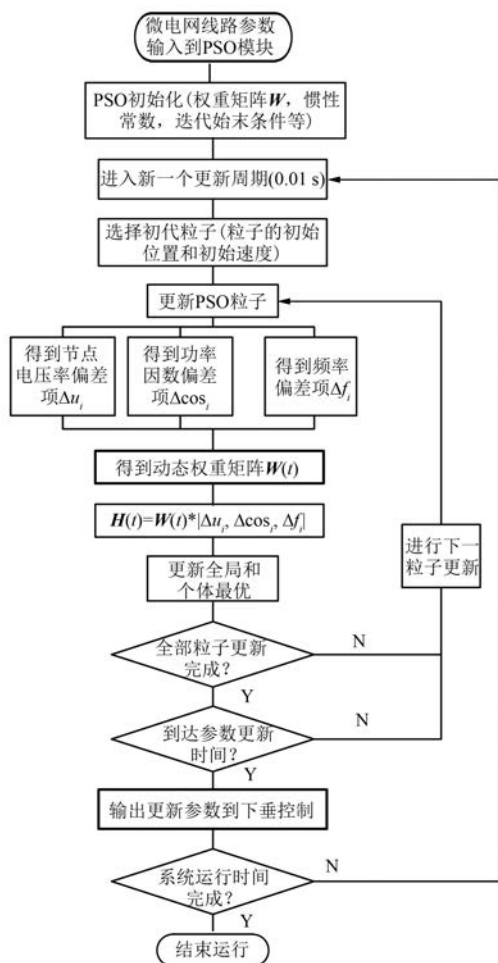


图 5 PSO 算法优化下垂系数流程图

步骤如下:在规定的时刻采集各 ES 本地信息,包括节点电压  $u_{si}(i=1,2,3)$ 、PCC $_i(i=1,2,3)$  节点频率、NCL $_i(i=1,2,3)$  的电压和电流经解耦计算后的有功功率和无功功率同时生成 NCL 功率因数,采样实际值与给定参考值比较后,形成的偏差输入到 PSO 模块,并根据各偏差动态不平衡度设置动态权重矩阵,同时更新下垂系数  $m_i$ 、 $n_i(i=1,2,3)$ ,通过算法迭代更新从而协调优化统一电能质量降低不平衡度,此时下垂优化模块将最优结果反馈到 PWM 发生器,通过调节 ES 的电压幅值控制流向负载的功率,缓冲供电侧和负载之间的功率不平衡,实现 CL 电压稳定和系统频率控制,消除对 RES 发电的不利影响。

### 3.3 PSO 算法实时改进下垂系数

PSO 算法结合下垂控制模块的控制过程如图 6 所示。为了方便,图 6 中仅画出单个 ES 结合

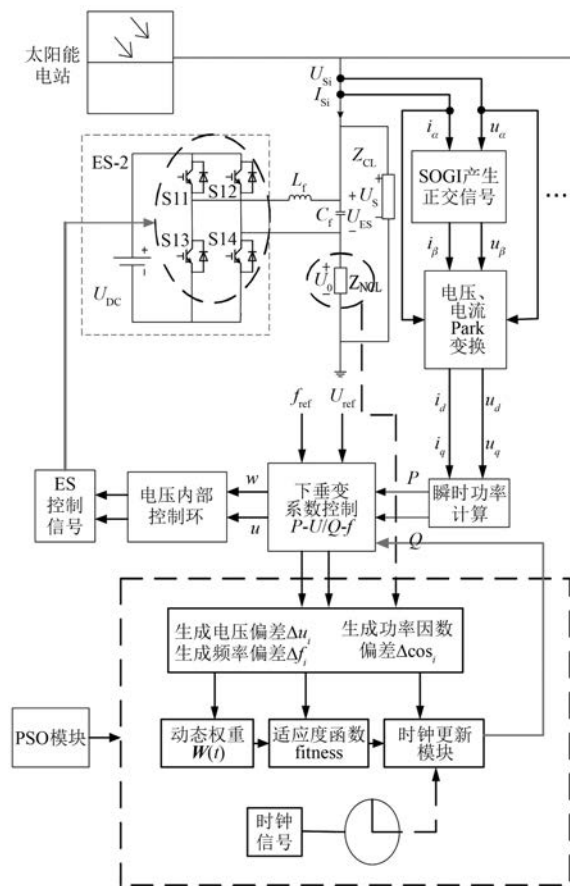
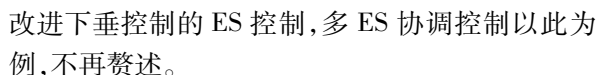


图 6 算法优化下垂系数控制结构图

从图 6 可以看出,算法模块和传统下垂控制相结合,实时交互更新,下垂控制模块采集瞬时有功功率和无功功率,分别通过线路偏差信息如各个节点电压偏差、频率偏差,NCL 功率因数偏差等实时输入到 PSO 模块。在算法模块中初次对下垂系数进行更新,根据不同类型的偏差程度分别对各个节点电压偏差,频率偏差和功率因数偏差进行动态加权,计算适应度函数后更新 6 个下垂系数粒子,完成首次循环。同时,利用自适应均值惯性权重因子  $w$  加快算法的收敛速度。PSO 模块将优化结果反馈到下垂控制模块更新下垂系数来降低电压不平衡度。

传统下垂控制与改进下垂控制对比示意图如图 7、图 8 所示。由此可知,在对下垂系数进行优化的过程中,在线路阻抗较大或电网电压不平衡时下垂系数过大会使电压变化率和频率变化率变

大从而对系统的稳定造成影响,为了保证算法优化过程中系统的稳定性,参考 IEEE 1547—2003 标准,设定频率偏差  $\Delta f$  和电压偏差  $\Delta U$  的阈值分别是 0.3 Hz 和 10%,超过阈值则认为进入不稳定区间,对下垂系数的优化范围做出限定。

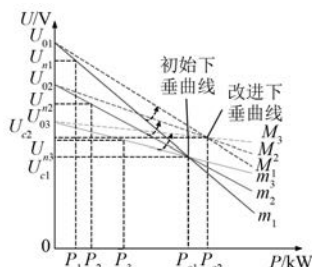


图7 P-U改进前后下垂曲线

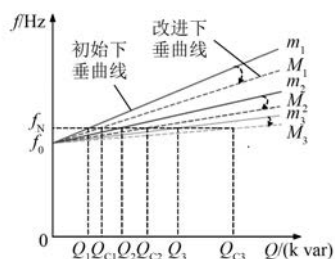


图8 Q-f改进前后下垂曲线

#### 4 仿真案例与分析

以三 ES-2 并联为例来模拟光伏发电下多 ES 协调稳压控制,来验证所提控制策略的有效性。仿真时间设置为 0.3 s。参数设置为:电网电压 380 V,低通滤波电感和电容分别为 3 mH、50  $\mu$ F,阻感性负载  $P=9\ 000$  W,  $Q=1\ 000$  var,阻性负载  $P=10\ 000$  W,阻容性负载  $P=10\ 000$  W,  $Q=1\ 000$  var;ES<sub>1</sub> 初始有功下垂系数  $m_1=3\times 10^{-4}$ , ES<sub>1</sub> 初始无功下垂系数  $n_1=1.5\times 10^{-5}$ , ES<sub>2</sub> 初始有功下垂系数  $m_2=2\times 10^{-4}$ , ES<sub>2</sub> 初始无功下垂系数  $n_2=10^{-5}$ , ES<sub>3</sub> 初始有功下垂系数  $m_3=10^{-4}$ , ES<sub>3</sub> 初始无功下垂系数  $n_3=0.5\times 10^{-5}$ 。设定 0~0.3 s 光伏发电引起 CL 电压产生不平衡,在传统下垂控制下,仿真结果如图 9 所示。各个节点电压在参考电压附近波动,不能产生稳定的电压,明显看出基于传统下垂控制各节点电压波动范围较大,对比改进下垂控制如图 10 所示。下垂控制模块迅速识别到线路不平衡状况将信息输出到优化 PSO 模块,进而在模块内进行优化并实时输出更

新后的下垂系数,保证各节点电压  $u_{s1}, u_{s2}, u_{s3}$  均能实时稳定在电压 322、311、301 V 上,随着线路阻抗降低,电压依次减少;并且  $u_{s1}$  节点电压波动范围在  $(322\pm 2)$  V 内,  $u_{s2}$  节点电压波动范围在  $(311\pm 1)$  V 内,  $u_{s3}$  节点电压波动范围在  $(301\pm 1)$  V 内,符合电压上下浮动标准。

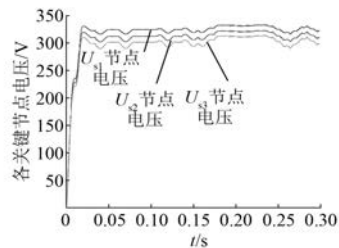


图9 传统下垂控制

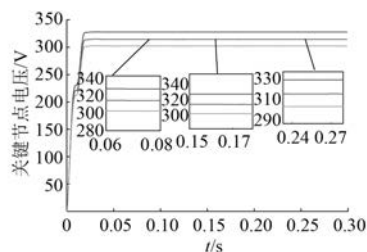


图10 改进下垂控制

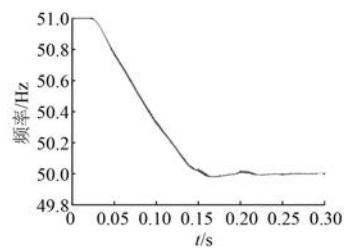


图11 系统各关键节点频率

系统各关键节点频率和功率因数对比如图 11、图 12 所示。由图 11 可知,基于 PSO 算法改进下垂控制下系统节点电压频率均稳定在约 50 Hz,有效抑制了电压不平衡下对系统频率的影响。从图 12 可以看出,算法模块采集 NCL 功率因数偏差输入到下垂控制中,改进下垂后的功率因数以 ES<sub>1</sub> 串联的 NCL 为例,其功率因数有效稳定在 0.65 以上,对比传统下垂控制其稳定性实时增加,提高了系统的稳定性。

#### 5 结语

本文针对光伏发电和线路阻性较大情况下的

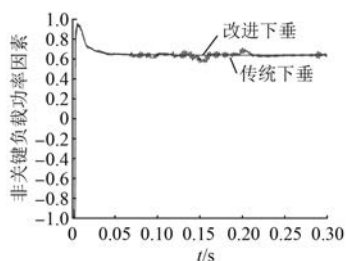


图 12 功率因数对比

问题,提出了一种基于二阶广义积分发生器构造虚拟正交分量的单相交流系统下多 ES 协调稳压控制,同时结合优化 PSO 算法,对各个 SL 并联的 CL 电压,频率以及 NCL 功率因数不平衡度进行实时检测和控制,最后对上述控制策略进行仿真实时验证,得到如下结论:

(1) 本文所提出的 PSO 算法实时检测各个节点电压,频率不平衡度并与下垂模块交互,在网侧电压不平衡和线路阻性较大时,可以精确辨识系统运行的不平衡度并实时更新下垂模块,将各自 CL 两端电压实时稳定;与传统下垂控制相比,对不平衡电网电压不敏感。

(2) 该控制策略仅考虑恒功率负载,没有验证其他类型负载如非线性负载情况,这将是进一步研究的对象。

### 【参考文献】

- [ 1 ] ZHANG X. China eyes 20% renewable energy by 2020[ N ]. China Daily, 2009-06-10( 2 ).
- [ 2 ] 武倩羽,黄永章,周莹坤,等. 新能源同步机并网系统的阻尼特性[ J ]. 电力系统自动化, 2019, 43( 15 ): 80.
- [ 3 ] 杜梅,叶涛. 新能源并网对电力系统电能质量的影响[ J ]. 数字通信世界, 2019( 7 ): 144.
- [ 4 ] HUI S Y, LEE C K, WU F F. Electric springs—a new smart grid technology[ J ]. IEEE Transaction on Smart Grid, 2012, 3( 3 ): 1552.

- [ 5 ] 尹发根,王淳. 电力弹簧研究进展:原理、拓扑结构、控制和应用[ J ]. 电网技术, 2019, 43( 1 ): 174.
- [ 6 ] LEE C K, CHAUHURI N R, CHAUHURI B, et al. Drooping control of distributed electric spring for stabilizing future power grid[ J ]. IEEE Transaction on Smart Grid, 2013, 4( 3 ): 1558.
- [ 7 ] CHEN J, YAN S, HUI S Y R. Using consensus control for reactive power sharing of distributed electric springs[ C ]//2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition ( ECCE ), 2017.
- [ 8 ] 吕振宇,吴在军,窦晓波,等. 基于离散一致性的孤立直流微网自适应下垂控制[ J ]. 中国电机工程学报, 2015, 35( 17 ): 4397.
- [ 9 ] CHEN J, YAN S, YANG T, et al. Practical evaluation of droop and consensus control of distributed electric springs for both voltage and frequency regulation in microgrid[ J ]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34( 7 ): 6947.
- [ 10 ] 吴捷,王宝华. 基于最优比例积分的电力弹簧控制器设计[ J ]. 电气自动化, 2017, 39( 4 ): 39.
- [ 11 ] MA G, XU G, CHEN Y, et al. Voltage stability control method of electric springs based on adaptive PI controller[ J ]. International Journal of Electric Power & Energy Systems, 2018, 95: 202.
- [ 12 ] 周建萍,李欣煜,茅大钧,等. 基于改进 PSO 算法的非理想电压条件下电力弹簧控制策略[ J ]. 电力系统自动化, 2018, 42( 22 ): 165.
- [ 13 ] 周建萍,邓玉君,茅大钧,等. 基于改进 AFSA 的电力弹簧新型电压频率控制策略[ J ]. 可再生能源, 2019, 37( 10 ): 1472.
- [ 14 ] 王旭冲,陈兵,尹香,等. 电力弹簧在电压暂降治理中的应用研究[ J ]. 电气技术, 2017( 2 ): 65.
- [ 15 ] 王青松. 电力弹簧若干关键技术研究[ D ]. 南京:东南大学, 2016.
- [ 16 ] 程明,王青松,张建忠. 电力弹簧理论分析与控制器设计[ J ]. 中国电机工程学报, 2015, 35( 10 ): 2436.

### [ 期刊订阅 ]

联系地址:上海市武宁路 505 号《电机与控制应用》编辑部

邮编: 200063

电话: 021-62574990-462

邮箱: eec@seari.com.cn

国内邮发代号: 4-199

每册定价: 12.00 元

全年定价: 144.00 元