

# 控制与决策

Control and Decision

不平衡电网电压下基于量子粒子群并网变流器功率/电流协调控制

刘军, 赵晨聪, 谢宙桦, 周飞航

引用本文:

刘军, 赵晨聪, 谢宙桦, 等. 不平衡电网电压下基于量子粒子群并网变流器功率/电流协调控制[J]. *控制与决策*, 2021, 36(4): 901–908.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0885>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 基于虚拟角急动度并网控制策略

Grid connected strategy based on virtual angular jerk

控制与决策. 2021, 36(5): 1268–1272 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1030>

### 基于指数趋近律的车载复合储能系统全局滑模控制

Global sliding mode control of vehicle-mounted hybrid energy storage system based on exponential reaching law

控制与决策. 2021, 36(4): 885–892 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0478>

### 基于条件生成对抗网络的不平衡学习研究

Research on imbalanced learning based on conditional generative adversarial networks

控制与决策. 2021, 36(3): 619–628 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0522>

### 并网逆变器分数阶虚拟惯性的虚拟同步发电机控制技术

Virtual synchronous generator control technology with fractional virtual inertia for grid-connected inverters

控制与决策. 2021, 36(2): 463–468 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0391>

### 阴影条件下基于迁移强化学习的光伏系统最大功率跟踪

Transfer reinforcement learning based maximum power point tracker of PV systems under partial shading condition

控制与决策. 2020, 35(12): 2939–2949 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0412>

# 不平衡电网电压下基于量子粒子群并网变流器 功率/电流协调控制

刘军<sup>1†</sup>, 赵晨聪<sup>1</sup>, 谢宙桦<sup>2</sup>, 周飞航<sup>1</sup>

(1. 西安理工大学自动化与信息工程学院, 西安 710048; 2. 西安热工研究院有限公司, 西安 710054)

**摘要:** 在不平衡电网电压情况下, 风电系统的不脱网运行会导致系统输出功率出现波动, 并网电流出现显著的谐波畸变。由于恒定的输出功率和良好的并网电流质量无法同时实现, 对此, 提出一种基于量子粒子群 (quantum particle swarm optimization, QPSO) 优化算法来实现功率/电流协调控制的方案。在电流参考值的计算中引入调节系数  $\alpha$  和  $\beta$ , 并推导出功率波动幅值、电流谐波畸变率与调节系数的关系。为了同时兼顾功率和电流, 以输出功率波动最小为控制目标, 以电流谐波畸变率限值为约束条件, 建立调节系数的优化模型。在不同类型的不平衡电压故障下, 通过 Matlab 仿真实现功率/电流的协调控制, 从而验证所提出方法的可行性及有效性。

**关键词:** 不平衡电网; 并网变流器; 量子粒子群; 功率波动; 电流谐波畸变率; 协调控制

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2019.0885

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



**引用格式:** 刘军, 赵晨聪, 谢宙桦, 等. 不平衡电网电压下基于量子粒子群并网变流器功率/电流协调控制[J]. 控制与决策, 2021, 36(4): 901-908.

## Coordinate control of grid-connected converter based on QPSO under unbalanced grid voltage

LIU Jun<sup>1†</sup>, ZHAO Chen-cong<sup>1</sup>, XIE Zhou-hua<sup>2</sup>, ZHOU Fei-hang<sup>1</sup>

(1. College of Automation, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Xi'an Thermal Power Research Institute Co. Ltd, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** Under unbalanced grid voltage, the ride-through operation of wind power systems will lead to fluctuations on output power and obvious harmonic distortion in grid-connected current. For the problem of that the constant output power and good current quality can not be achieved simultaneously, a power/current coordinate control scheme based on the quantum particle swarm optimization (QPSO) algorithm is proposed. The regulation coefficients  $\alpha$  and  $\beta$  are introduced into the calculation of reference current, and the relationships between the amplitude of power fluctuations, the harmonic distortion rate of current and the regulation coefficients are deduced. In order to take the power and current into account, the optimization model of the regulation coefficients is established with the minimum fluctuations on output power as the control objective and the current harmonic distortion limit as the constraint condition. Under the condition of different types of voltage unbalance faults, the coordinate control of power and current is realized using Matlab, which verifies the feasibility and effectiveness of the proposed control scheme.

**Keywords:** unbalance grid voltage; grid-connected converter; quantum particle swarm optimization (QPSO); power fluctuation; current harmonic distortion rate; coordinate control

## 0 引言

随着经济发展水平以及人们环保意识的不断提高, 可再生能源的发展受到了越来越多的关注。在众多的可再生能源中, 由于风电具有装机容量增长空间大、成本下降快、能源永不耗竭等优势, 全球的风电行

业快速发展。并网变流器作为风电以及大规模储能系统的并网接口, 在并网控制中起着重要作用<sup>[1]</sup>。但在实际系统中, 并网变流器的运行性能易受电网电压不平衡等异常条件的影响。电网电压的不平衡故障是电力系统中常见的故障之一, 大功率单相负载的介

收稿日期: 2019-06-20; 修回日期: 2019-11-12.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61773016).

责任编委: 郭庆来.

<sup>†</sup>通讯作者. E-mail: liujun0310@sina.com.

入、单相负载在电网中的不平衡分配以及单相负载用电的随机性等因素,都会造成电网不平衡<sup>[2]</sup>.因此,研究并网变流器在不平衡电网电压下的控制至关重要.

不平衡电网电压情况下对并网变流器的控制较为传统的方法是双电流环矢量控制<sup>[3-5]</sup>,即在正负序双旋转 $dq$ 坐标系下分别对电流的正、负序分量进行控制,进而实现对并网电流的有效控制.但该方法需要繁琐的坐标变换,而且控制器数量较多,计算量较大,不易实现.对此,人们提出了能对交流信号进行有效控制的控制器,如比例谐振(PR)控制器<sup>[6]</sup>和比例复数积分(PCI)控制器<sup>[7]</sup>等,并广泛地应用于并网变流器的控制.采用该类控制器可以在两相静止坐标系下实现对变流器的控制,避免了复杂的坐标变换及正负序分离环节,简化了控制结构.不平衡电网电压下对并网变流器的控制主要以抑制有功功率波动、无功功率波动以及提高并网电流质量为主.文献[8-9]提出了分别以抑制有功功率波动、无功功率波动及负序电流分量为目标的控制策略,但这3种控制目标的实现是相互独立的,顾此失彼.文献[10-12]对有功和无功功率进行统一控制,虽然抑制了输出功率的波动,但却以并网电流的严重畸变为代价.为了协调输出功率的波动程度以及电流的谐波畸变程度,文献[13]在电流参考值的计算中引入调节系数 $k$ ,通过调节 $k$ 值来降低并网电流中的低次谐波含量,进而达到协调控制功率和电流的目的,但该控制方案中基波及谐波支路中需要整定的控制参数较多,不易实现.文献[14]分析了功率波动以及电流谐波的产生原因,并进行了量化分析,利用加权的思想实现功率和电流的协调控制.但以上这两种协调控制均不能保证在整个电网故障期间电流质量满足并网要求.因此,如何更好地兼顾并网电流质量以及输出功率的波动抑制有待进一步的研究.

本文提出一种基于量子粒子群(QPSO)优化算法的并网变流器功率/电流协调控制策略.首先,在计算电流参考值时引入 $\alpha$ 和 $\beta$ 两个调节系数,推导出输出有功功率、无功功率波动值以及并网电流谐波畸变率的量化表达式.在此基础上,以输出有功及无功功率的波动加权值最小为控制目标,以并网电流畸变限值作为约束条件,建立调节系数 $\alpha$ 和 $\beta$ 的优化模型.利用可行性法则处理约束条件,并通过QPSO优化算法优化 $\alpha$ 和 $\beta$ ,使得三相电流质量满足并网要求的同时,输出功率波动值最小,实现电网电压不平衡下功率及电流的协调控制.

## 1 不平衡电网电压下并网变流器的控制

### 1.1 并网变流器模型

并网变流器的拓扑结构如图1所示<sup>[1]</sup>. $u_{ga}$ 、 $u_{gb}$ 、 $u_{gc}$ 分别为电网相电压, $u_{ca}$ 、 $u_{cb}$ 、 $u_{cc}$ 分别为变流器端电压, $L$ 和 $R$ 分别为电抗器电感和内阻, $U_{dc}$ 为直流侧电压.

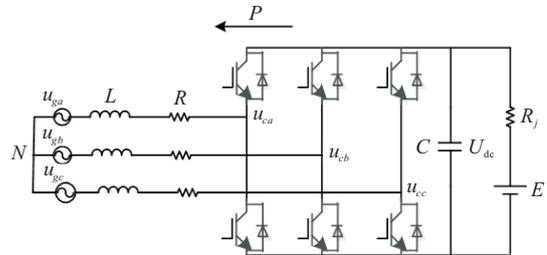


图1 并网变流器电路拓扑结构

### 1.2 并网电流的计算

电网电压不平衡时,根据对称分量法可将电压分解为正序分量、负序分量和零序分量,但是对于三相三线制系统,无零序分量的流通过路径,故可以不考虑零序分量.不平衡电网电压可表示为

$$\begin{bmatrix} u_{ga} & u_{gb} & u_{gc} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} U^+ \cos(\omega t + \theta^+) + U^- \cos(\omega t + \theta^-) \\ U^+ \cos(\omega t - 120^\circ + \theta^+) + U^- \cos(\omega t + 120^\circ + \theta^-) \\ U^+ \cos(\omega t + 120^\circ + \theta^+) + U^- \cos(\omega t - 120^\circ + \theta^-) \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中: $U^+$ 和 $U^-$ 分别表示正序和负序电压的幅值, $\theta^+$ 和 $\theta^-$ 分别表示正序和负序分量的初始相位, $\omega$ 表示电网电压频率.

通过Clarke坐标变换将三相电网电压变换到两相静止坐标系下,则有

$$\begin{bmatrix} u_{g\alpha} \\ u_{g\beta} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{ga} \\ u_{gb} \\ u_{gc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{g\alpha}^+ + u_{g\alpha}^- \\ u_{g\beta}^+ + u_{g\beta}^- \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中

$$\begin{bmatrix} u_{g\alpha}^+ \\ u_{g\beta}^+ \\ u_{g\alpha}^- \\ u_{g\beta}^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U^+ \cos(\omega t + \theta^+) \\ U^+ \sin(\omega t + \theta^+) \\ U^- \cos(\omega t + \theta^-) \\ -U^- \sin(\omega t + \theta^-) \end{bmatrix},$$

$u_{g\alpha}^+$ 、 $u_{g\beta}^+$ 及 $u_{g\alpha}^-$ 、 $u_{g\beta}^-$ 分别表示两相静止坐标系下的正、负序电压分量.

根据瞬时功率理论,有功功率和无功功率为

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} u_{g\alpha} & u_{g\beta} \\ u_{g\beta} & -u_{g\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中  $i_\alpha$  和  $i_\beta$  分别为两相静止坐标系下的电流分量.

根据风电场接入电力系统技术规定,功率因数应满足在超前0.95、滞后0.95内动态可调<sup>[15]</sup>. 为了实现最大功率因数控制,可设置无功功率  $Q^* = 0$ ,根据式(3),可得出在给定功率  $P^*$  下的电流参考值为

$$\begin{bmatrix} i_\alpha^* \\ i_\beta^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3}P^* \frac{(u_{g\alpha}^+ + u_{g\alpha}^-)}{(u_{g\alpha}^+ + u_{g\alpha}^-)^2 + (u_{g\beta}^+ + u_{g\beta}^-)^2} \\ \frac{2}{3}P^* \frac{(u_{g\beta}^+ + u_{g\beta}^-)}{(u_{g\alpha}^+ + u_{g\alpha}^-)^2 + (u_{g\beta}^+ + u_{g\beta}^-)^2} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

整理并化简式(4),可得参考电流矢量表达式为

$$i^* = \frac{2}{3}P^* \frac{u^+ + u^-}{|u^+|^2 + 2u^+u^- + |u^-|^2}, \quad (5)$$

其中  $u^+$  和  $u^-$  分别表示电网电压矢量的正、负序分量.

在电网电压不平衡情况下,针对抑制输出有功功率波动、无功功率波动以及电流负序分量这3个目标,通常可采用瞬时有功-无功控制(IARC)、平均有功-无功控制(AARC)、正序分量瞬时控制(IPSC)、平衡正序分量控制(BPSC)、正负序分量补偿控制(PNSC)等控制策略对并网变流器进行控制,但以上控制策略均不能同时兼顾平稳的输出功率以及良好的并网电流质量. 因此,可通过引入调节系数  $\alpha$  和  $\beta$  的方法来实现功率和电流的协调控制. 并网电流矢量参考值的计算表达式为

$$i^* = \frac{2}{3}P^* \frac{(u^+ + \alpha u^-)}{|u^+|^2 + (1 + \alpha)\beta u^+u^- + \alpha|u^-|^2}. \quad (6)$$

其中:  $\alpha \in [-1, 1], \beta \in [0, 1]$ . 可通过调节  $\alpha$  和  $\beta$  使得系统输出电流在满足并网要求的同时输出功率波动幅值最小.

## 2 不平衡电网电压下输出功率波动及电流畸变分析

### 2.1 功率波动幅值及电流谐波畸变率的计算

不平衡电网电压下,系统输出有功功率、无功功率的波动幅值分别为

$$\Delta P = \left( \frac{P - P^*}{P^*} \right)_{\max}, \quad (7)$$

$$\Delta Q = \left( \frac{Q}{P^*} \right)_{\max}. \quad (8)$$

并网电流的谐波畸变率为

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{i_{\text{rms}}^2 - i_{1\text{rms}}^2}}{i_{1\text{rms}}}. \quad (9)$$

其中:  $i_{\text{rms}}$  为电流全波有效值,  $i_{1\text{rms}}$  为电流基波有效值. 有

$$i_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}, \quad (10)$$

$$i_{1\text{rms}} = \sqrt{\left( \frac{1}{T} \int_0^T i \sin(\omega t) dt \right)^2 + \left( \frac{1}{T} \int_0^T i \cos(\omega t) dt \right)^2}. \quad (11)$$

设电网电压不平衡度为  $n = U^-/U^+$ ,根据式(1)、(2)和(6),可得出三相并网输出电流,以A相电流为例,其电流为

$$i_a^*(t) = \frac{2P^*(1 + \alpha n) \cos(\omega t)}{3U^+[1 + \alpha n^2 + (1 + \alpha)\beta n \cos(2\omega t)]}. \quad (12)$$

将式(12)代入(9)~(11),可得电流谐波畸变率为

$$\text{THD} = \sqrt{\frac{(1 + \alpha)^2 \beta^2 n^2}{2N(1 + \alpha n^2 - N)}} - 1, \quad (13)$$

其中  $N = \sqrt{1 + (2\alpha - (1 + \alpha)^2 \beta^2) n^2 + \alpha^2 n^4}$ .

联立式(3)、(6)~(8),可得输出有功功率、无功功率的波动幅值分别为

$$\Delta P = \frac{(1 + \alpha)(1 - \beta)n}{1 - (1 + \alpha)\beta n + \alpha n^2}, \quad (14)$$

$$\Delta Q = \frac{(1 - \alpha)n}{1 + \alpha n^2}. \quad (15)$$

基于式(13)~(15),可得出不同的控制方式在不同调节系数下的功率波动值和电流谐波畸变率,如表1所示.

表1 不同调节参数下的功率波动值和电流谐波畸变率

控制方式	$\alpha$	$\beta$	$\Delta P$	$\Delta Q$	THD
IARC	1	1	0	0	$\frac{1}{\sqrt{n^2 - 1}}$
AARC	1	0	$\frac{2n}{1 + n^2}$	0	0
IPSC	0	1	0	$n$	$\sqrt{\frac{n^2}{2\sqrt{1 - n^2}(1 - \sqrt{1 - n^2})}} - 1$
BPSC	0	0	$n$	$n$	0
PNSC	-1	1	0	$\frac{2n}{1 - n^2}$	0

### 2.2 功率波动及电流谐波畸变特性分析

基于式(13)~(15),若电网发生不平衡故障,则电压不平衡度  $n = 0.11$  时,可得有功功率波动幅值  $\Delta P$  以及电流谐波畸变率 THD 分别随调节系数  $\alpha$  和  $\beta$  的变化曲线,如图2所示. 由图2(a)可知,输出有功功率波动幅值  $\Delta P$  随调节系数  $\beta$  的增大而减小,随  $\alpha$  的增大而增大,因此,可通过增大  $\beta$  或减小  $\alpha$  来减小输出有功功率的波动. 由图2(b)可知,随着调节系数  $\alpha$  和  $\beta$  的减小,并网电流谐波畸变率会逐渐降低. 图2(c)为电流谐波畸变率的等高线,图中箭头所示区域为电流谐波畸变率不超过并网规定限值5%的可行域. 通过以上分析可知,在电网故障类型确定的情况下,通过合理选择调节系数  $\alpha$  和  $\beta$  可以实现输出功率及电流的协调控制.

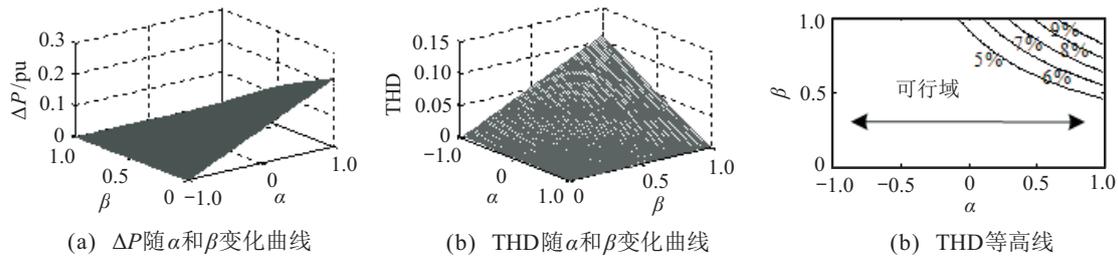


图2 功率波动及电流谐波畸变率随  $\alpha$  和  $\beta$  变化曲线

### 3 调节系数的优化分析

#### 3.1 优化模型的建立

电网电压不平衡时为了兼顾功率及电流这两方面控制目标,选择有功及无功功率波动幅值线性加权最小为控制目标,以电流谐波畸变率不越限为约束条件建立调节系数  $\alpha$  和  $\beta$  的优化模型.

目标函数为

$$\min f = \omega_p \left[ \frac{(1+\alpha)(1-\beta)n}{1-(1+\alpha)\beta n + \alpha n^2} \right] + \omega_q \left[ \frac{(1-\alpha)n}{1+\alpha n^2} \right], \quad (16)$$

其中  $\omega_p$  和  $\omega_q$  分别为有功功率波动幅值和无功功率波动幅值的权重系数.

约束条件为

$$0 < \text{THD} < \text{THD}_{\max}, \quad (17)$$

其中  $\text{THD}_{\max}$  表示并网电流畸变率的最大限值,即风电并网标准中所规定的电流总谐波畸变率小于 5% 的标准.

#### 3.2 量子粒子群优化算法

粒子群优化算法 (PSO) 的思想来源于鸟群飞行觅食的行为,是一种群体智能优化算法. 该算法将优化问题的潜在解抽象为  $D$  维空间中的一个粒子,每个粒子根据目标函数都有其相对应的适应度值,粒子的位置可通过调整其自身飞行的速度来改变. 虽然 PSO 算法简单易实现,但该算法容易陷入局部最优,被证明不能完全达到全局收敛. 基于此, Sun 等<sup>[16]</sup> 提出了 QPSO 算法,该算法赋予了粒子的量子属性,粒子将处于量子的束缚态中,以一定的概率出现在束缚态中的任何一点,可以达到全局收敛. 相比于 PSO 算法, QPSO 算法引入了  $\delta$  势阱场,粒子的收敛过程以  $P$  点为吸引子,周边粒子不断向吸引子靠近. 在量子空间中,不能同时确定量子的速度和位置,因此,采用波函数来描述粒子的运动状态,波函数可通过对定态薛定谔方程求解得到. 基于波函数,根据蒙特卡洛随机模拟方法可得出粒子所在位置. 由于调节系数的优

化模型是一种含有约束条件的优化模型,采用可行性法则的方法来解决该约束优化问题. 定义个体的可行度为

$$V(x) = \{\max(g(x), 0)\}. \quad (18)$$

当  $V(x) = 0$  时,表示此时粒子为可行个体;当  $V(x) > 0$  时,表示此时粒子为不可行个体.

根据可行性法则,可通过以下条件来处理约束优化问题:

- 1) 如果两个个体  $x_i$  和  $x_j$  均为可行个体,则目标函数值小的个体为优;
- 2) 如果两个个体  $x_i$  和  $x_j$  中其中一个为可行个体,另一个为不可行个体,则可行个体为优;
- 3) 如果两个个体  $x_i$  和  $x_j$  均为不可行个体,则比较它们的约束违约度,违反约束程度小的个体为优.

基于可行性法则的 QPSO 算法步骤如下:

1) 对粒子的信息进行初始化.

2) 基于粒子个体历史最优解  $p_{\text{best}}$ , 全局历史最优解  $g_{\text{best}}$ , 对吸引子  $P$  点进行计算,计算公式如下:

$$P = \frac{\varphi_1 p_{\text{best}} + \varphi_2 g_{\text{best}}}{\varphi_1 + \varphi_2}, \quad (19)$$

其中  $\varphi_1$  和  $\varphi_2$  分别表示 (0, 1) 中的随机数.

3) 计算粒子的平均最好位置  $m_{\text{best}}$ , 即

$$m_{\text{best}} = \sum_{i=1}^M \frac{p_i}{M} = \left( \sum_{i=1}^M \frac{p_{i1}}{M}, \sum_{i=1}^M \frac{p_{i2}}{M}, \dots, \sum_{i=1}^M \frac{p_{iD}}{M} \right). \quad (20)$$

其中:  $M$  为种群中的粒子个数,  $D$  为粒子维数,  $p_i$  为第  $i$  个粒子的个体历史最优解  $p_{\text{best}}$ .

4) 更新粒子所在位置,有

$$x(k+1) = P \pm \beta |m_{\text{best}} - x(k)| \ln\left(\frac{1}{u}\right). \quad (21)$$

其中:  $u$  表示 (0, 1) 中的随机数;  $\beta$  表示收缩-扩张系数, 可用于控制收敛速度.

5) 计算此时粒子的适应度值,对该粒子的可行度进行分析.

6) 更新粒子的个体历史最优解  $p_{\text{best}}$  和全局历史最优解  $g_{\text{best}}$ .

7) 判断是否达到终止条件, 如果达到终止条件则停止, 并输出全局最优解  $g_{best}$ ; 否则转至步骤2) 继续寻优, 直到满足终止条件.

### 3.3 控制策略的实现

不平衡电网电压下采用本文所提出方案的控制结构框图如图3所示. 基于调节系数的优化模型, 采用QPSO算法对调节系数进行优化, 选取合适的  $\alpha$  和  $\beta$ . 本文采用能够对交流信号进行有效控制的PCI控制器来实现对电流的控制, 简化了系统结构.

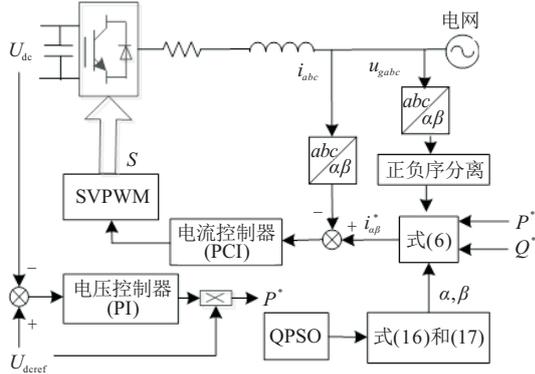


图3 电网电压不平衡下并网变流器控制结构

## 4 仿真分析

电网电压不平衡情况下, 为了验证本文所提出的功率/电流协调控制策略的正确性及有效性, 基于Matlab/Simulink对并网变流器的控制进行仿真. 在0.1~0.5s期间, 模拟3种不同类型的电压不平衡: 在情况1下, 仅A相电压发生幅值跌落; 在情况2下, 三相电压不仅幅值不平衡, 而且相位也发生了偏移; 在情况3下, A相电压幅值在0.1~0.3s跌落50%, 在0.3~0.5s跌落30%, 电压的不平衡度  $n$  由0.2变化为0.11. 主要参数如表2所示.

现分别对侧重于功率控制的IARC以及电流控制的BPSC两类较极端的控制方式进行仿真. 图4为

表2 并网变流器主要参数

主要参数	数值
不平衡三相电网电压(情况1) $U_g/V$	$394\angle 90^\circ, 563\angle -30^\circ,$ $563\angle -150^\circ$
不平衡三相电网电压(情况2) $U_g/V$	$395\angle 85^\circ, 539\angle -28^\circ,$ $587\angle -148^\circ$
不平衡三相电网电压(情况3) $U_g/V$	$282\angle 90^\circ, 563\angle -30^\circ,$ $563\angle -150^\circ,$ $394\angle 90^\circ, 563\angle -30^\circ,$ $563\angle -150^\circ$
电网侧电感 $L/H$	0.006
电网侧电阻 $R/\Omega$	0.1
直流母线电压 $U_{dc}/V$	1200
电流控制 $K_{pi}/K_{ii}$	0.05/50
母线电压控制 $K_{pu}/K_{iu}$	0.3/220

采用IARC控制的仿真结果. 可以看出, 在3种不同类型的电压故障情况下, 输出有功和无功功率的波动均非常小, 但并网电流却畸变严重. 从而验证了IARC控制方式主要注重于输出功率的平滑控制, 而对并网电流质量的控制欠佳. BPSC控制下的仿真结果如图5所示. 由该图可以看出, 在3种不同类型的电压故障情况下, 三相并网电流正弦度及平衡度较好, 但输出有功及无功功率波动明显. 因此, 该控制策略主要注重于实现良好的并网电流质量, 在输出功率波动的抑制方面效果欠佳.

图6为采用文献[13]所提出的功率/电流协调控制方案的控制结果. 该方案可通过系数  $k$  来实现输出功率的恒定控制和电流的平衡控制: 在0.1~0.2s期间  $k = 0$ , 输出电流平衡, 但输出功率波动; 在0.2~0.4s期间  $k$  以斜率为5 pu/s在[0, 1]之间增大, 随着  $k$  值的增大, 输出功率的波动逐渐减小, 但是并网电流的不平衡度及畸变程度却逐渐增大; 在0.4~0.5s期间  $k = 1$ , 输出功率恒定无波动, 但此时

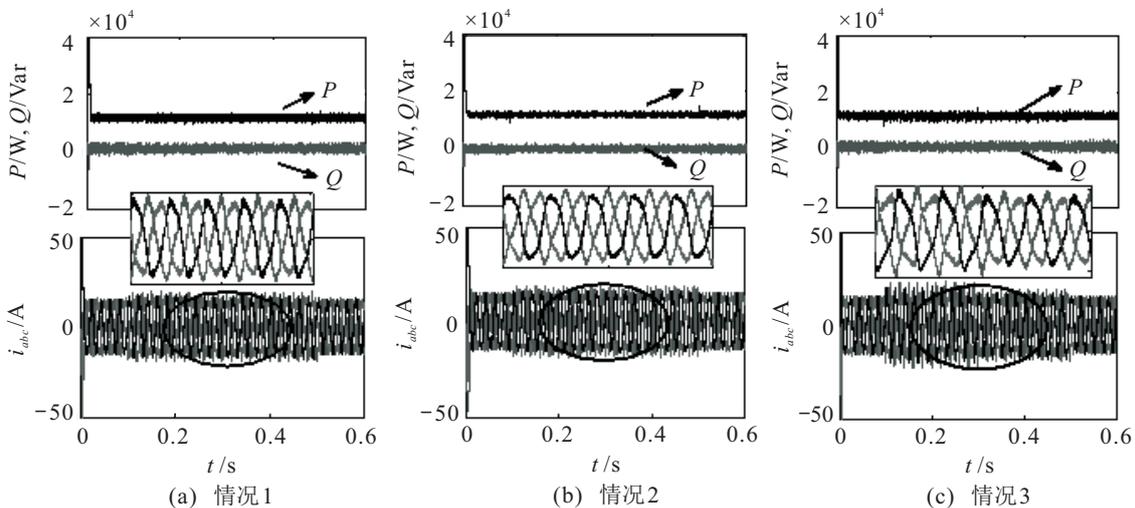


图4 IARC仿真结果

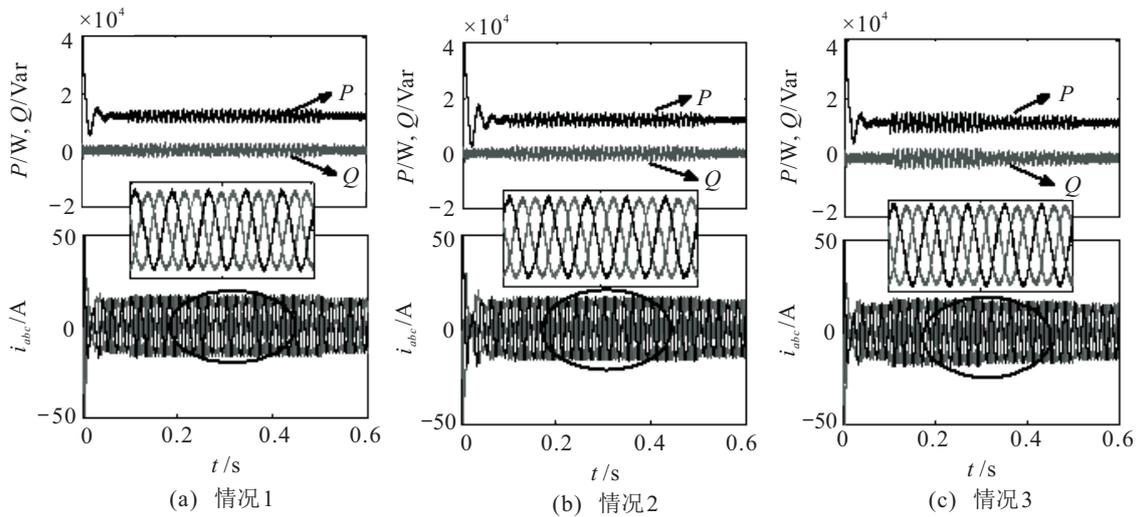


图5 BPSO仿真结果

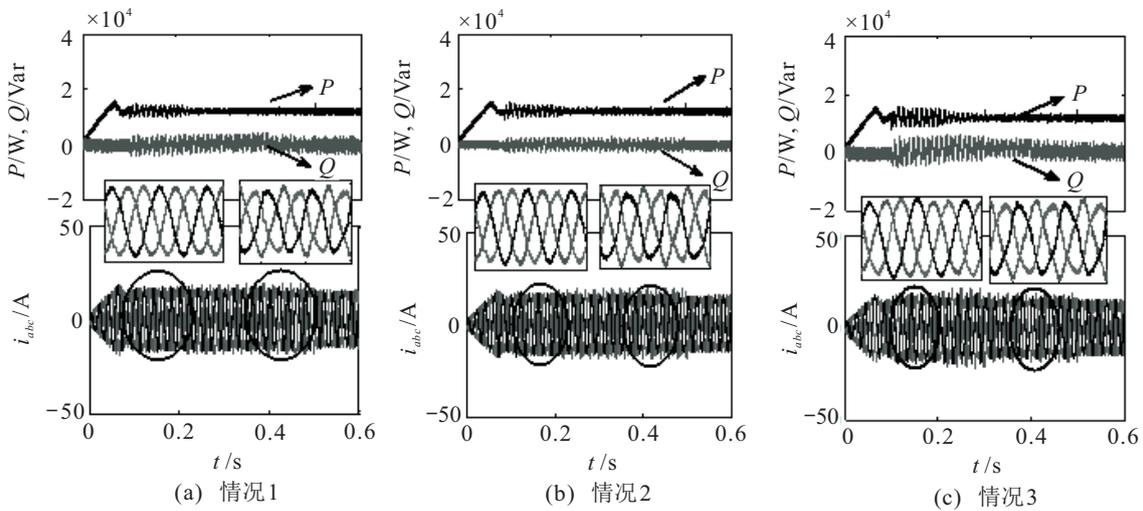


图6 采用文献[13]协调控制方案的控制结果

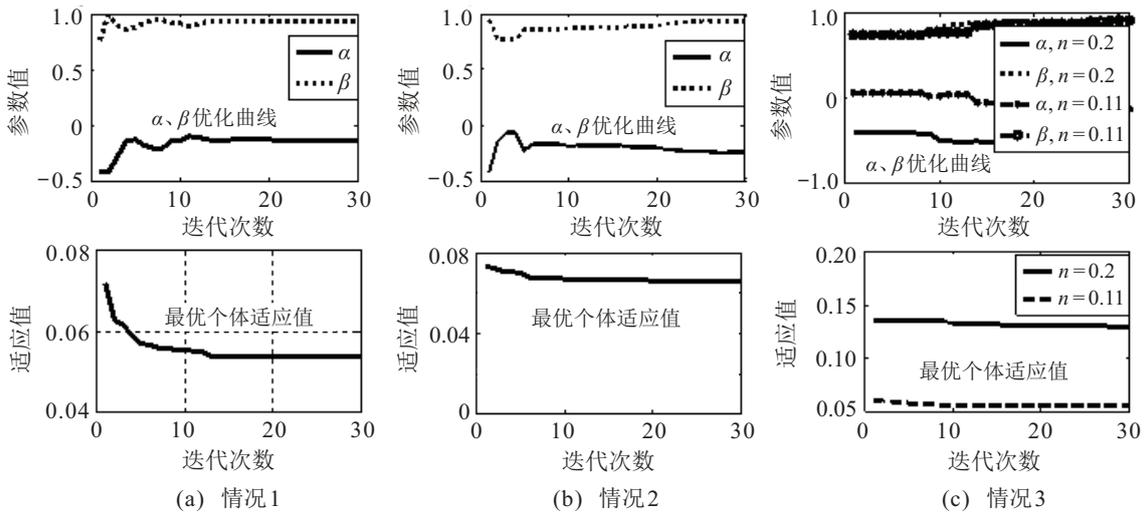


图7 优化结果

输出电流的畸变程度较高. 由此可以看出, 虽然此方法可根据实际情况通过调节 $k$ 值实现功率和电流的协调控制, 但是并未实现功率与电流质量的折中控制.

针对式(16)中有功率项及无功功率项中权重系数的选取问题, 考虑并网系统的主要目的是向电网输送有功功率, 因此, 选取有功功率波动项的权重系数较高于无功功率波动项的权重系数, 即选取 $\omega_p =$

0.6,  $\omega_q = 0.4$ . 在前两种类型的电压故障情况下, 基于 QPSO 算法可得出优化后的调节系数分别为  $\alpha = -0.0896$ ,  $\beta = 0.9803$  以及  $\alpha = -0.1626$ ,  $\beta = 0.9721$ . 由于第3类电压故障情况下的电压不平衡度有所变化, 可以得出电压不平衡度变化下的优化系数为  $\alpha = (-0.5120, -0.1277)$ ,  $\beta = (0.9003,$

0.9180).  $\alpha$  和  $\beta$  优化曲线以及最优个体的适应值曲线如图7所示.

基于上述分析可知, 在最优调节系数下, 并网电流质量应该满足并网要求并且输出有功功率波动幅值与无功功率波动幅值加权最小. 图8所示为在3种不同类型的故障电压下, 采用最优化参数下的系统输

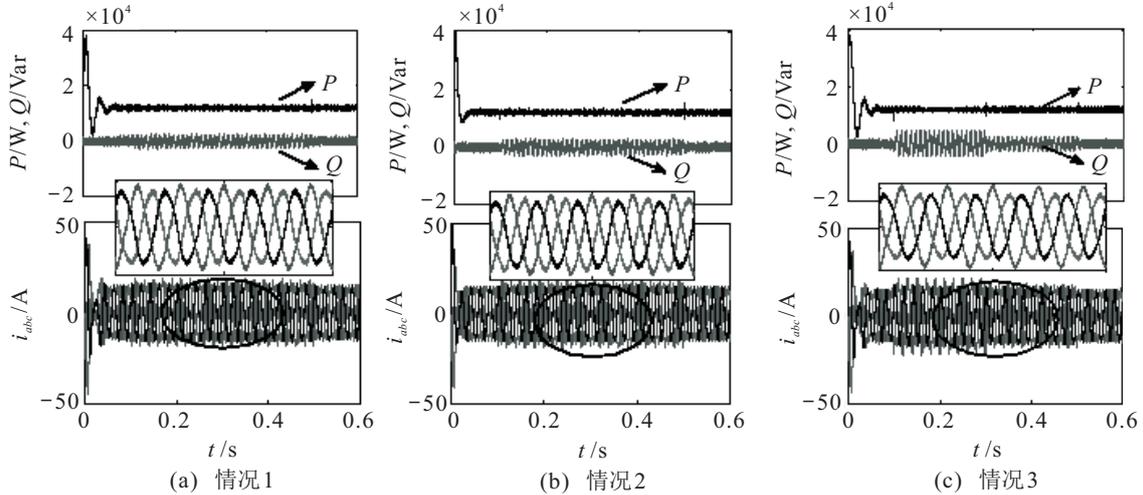


图8 优化结果

表3 不同调节系数下的计算值和仿真值

		情况1 ( $n = 0.11$ )							
$\alpha$	$\beta$	计算值/%			仿真值/%				
		THD	$\Delta P$	$\Delta Q$	THD <sub>ia</sub>	THD <sub>ib</sub>	THD <sub>ic</sub>	$\Delta P$	$\Delta Q$
0.1	0.5	3.03	6.43	9.89	3.13	3.04	2.84	9.1	11.31
0.4	0.5	3.84	8.3	6.57	3.85	4	3.89	11.59	8.19
0.4	0.8	6.17	3.49	6.57	6.32	5.98	5.94	4.89	8.53
-0.8	0.8	0.89	0.45	19.99	1.13	1.16	1.11	1.52	21.92
-0.8	1	1.11	0	19.99	1.34	1.23	1.41	0.63	22.53
0.8	1	9.95	0	2.18	10.16	10	9.9	0.41	3.32
-0.0896	0.9803	4.93	0.22	12	4.91	4.97	4.87	0.39	14.69
		情况2 ( $n = 0.13$ )							
$\alpha$	$\beta$	计算值/%			仿真值/%				
		THD	$\Delta P$	$\Delta Q$	THD <sub>ia</sub>	THD <sub>ib</sub>	THD <sub>ic</sub>	$\Delta P$	$\Delta Q$
0.1	0.5	3.42	7.32	11.6	3.49	3.64	3.85	8.53	13.62
0.4	0.5	4.33	9.46	7.41	4.58	4.56	3.68	11.85	9.16
0.4	0.8	6.96	4.01	7.41	7.05	7.13	7.13	6.31	9.49
-0.8	0.8	1.01	0.51	22.64	1.14	1.05	1.41	1.4	25.12
-0.8	1	1.26	0	22.64	1.49	1.3	1.37	1.68	25.4
0.8	1	11.25	0	2.45	11.1	11.08	10.94	2.33	4.16
-0.1626	0.9721	4.43	0.61	15.55	4.68	4.19	4.53	0.91	17.52
		情况3 ( $n = 0.2$ 变化至 $n = 0.11$ )							
$\alpha$	$\beta$	计算值(最大值)/%			仿真值(最大值)/%				
		THD	$\Delta P$	$\Delta Q$	THD <sub>ia</sub>	THD <sub>ib</sub>	THD <sub>ic</sub>	$\Delta P$	$\Delta Q$
0.1	0.5	5.5	12.3	17.93	7.49	7.53	7.42	17.1	22.8
0.4	0.5	6.94	15.98	11.81	8.5	8.28	8.13	18.15	16.57
0.4	0.8	11.23	7.07	11.81	12.32	12.29	11.95	10.15	15.31
-0.8	0.8	1.65	0.85	37.19	2.53	1.85	1.96	0.87	44.11
-0.8	1	2.07	0	37.19	2.39	3.33	2.59	2.13	44.28
0.8	1	18.31	0	3.88	18.94	18.93	18.62	1.97	7.28
(-0.5120, -0.1277)	(0.9003, 0.9180)	4.5	1.09	30.87	4.6	4.65	4.61	1.25	42.5

出功率及并网电流仿真结果. 由该图可以看出, 采用最优参数 $\alpha$ 和 $\beta$ 后, 三相并网电流的谐波畸变率均满足并网要求, 并且输出功率的波动较小.

为了进一步验证所得优化参数在控制电流质量及功率波动方面的有效性, 本文将几组不同调节系数下的功率波动幅值、电流谐波畸变率的计算值与仿真值进行对比, 如表3所示. 由表3可知, 在 $\alpha$ 值不变的情况下, 输出无功功率的波动值基本不变, 与式(15)是相符的. 不同调节系数下的功率波动幅值、电流谐波畸变率的计算值与仿真值基本相吻合. 同时也可看出, 在3种不同类型的电压故障情况下, 3组优化参数相比较其他调节参数而言, 在电流满足并网要求的基础上, 输出功率的波动幅值最小.

## 5 结论

针对在电网电压不平衡情况下并网变流器输出功率及并网电流难以协调控制的问题, 本文在分析输出功率及并网电流的基础上, 推导了输出有功功率波动幅值、无功功率波动幅值及并网电流质量与参考电流中调节系数间的关系. 以并网电流谐波畸变率为约束条件, 以输出功率的波动幅值最小为控制目标, 建立了电流调节系数的优化模型, 基于可行性法则的QPSO算法, 得出了最优的调节系数. 在3种不同类型的电网电压下, 通过对并网变流器的控制可知, 若在参考电流中采用优化后的调节系数, 则系统的输出电流质量在满足并网要求的条件下, 输出功率的波动幅值最小, 仿真结果与解析表达式的计算值是相符的, 从而验证了基于QPSO算法的功率/电流协调控制是有效的.

## 参考文献(References)

- [1] Jiang W D, Wu Z Q, She Y Y, et al. Control strategy of suppressing power secondary fluctuations of grid-connected inverter based on unbalanced grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(15): 106-111.
- [2] Miret J, Castilla M, Camacho A, et al. Control scheme for photovoltaic three-phase inverters to minimize peak currents during unbalanced grid-voltage sags[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(10): 4262-4271.
- [3] Kim K H, Jeung Y C, Lee D C, et al. LVRT scheme of PMSG wind power systems based on feedback linearization[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(5): 2376-2384.
- [4] Suh Y, Lipo T A. Control scheme in hybrid synchronous synchronous stationary frame for PWM AC-DC converter under generalized unbalanced operating conditions[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2006, 42(3): 825-835.

- [5] Ma K, Chen W J, Liserre M, et al. Power controllability of a three-phase converter with an unbalanced AC source[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(3): 1591-1604.
- [6] Wei X Y, Lu Y. A unified control strategy for VSC-HVDC under unbalanced grid conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(34): 50-57.
- [7] Guo X Q, Wu W Y. Improved current regulation of three-phase grid-connected voltage-source inverters for distributed generation systems[J]. IET Renewable Power Generation, 2010, 4(2): 101-115.
- [8] Jiang W D, Wu Z Q, Hu Y, et al. Analysis of control strategy for grid-connected inverter under different constraints based on asymmetric grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(19): 113-120.
- [9] Huang S D, Xiao L, Huang K Y, et al. Operation and control on the grid-side converter of the directly-driven wind turbine with PM synchronous generator during asymmetrical faults[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(2): 173-180.
- [10] Rodríguez P, Timbus A V, Teodorescu R, et al. Independent PQ control for distributed power generation systems under grid faults[C]. The Annual Conference on IEEE Industrial Electronics. Paris, 2006: 5185-5190.
- [11] Teodorescu R, Liserre M, Rodríguez P. Grid converters for photovoltaic and wind power systems[M]. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd., 2011: 256-258.
- [12] Rodríguez P, Timbus A V, Teodorescu R, et al. Flexible active power control of distributed power generation systems during grid faults[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(5): 2583-2592.
- [13] Wang Y C, Ou M Y, Chen Y D, et al. Coordinate control of power fluctuation suppression and current balance under unbalanced voltage conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(23): 6981-6987.
- [14] Guo X Q, Liu W Z, Lu Z G. Flexible power regulation and current-limited control of grid-connected inverter under unbalanced grid voltage faults[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(5): 7425-7432.
- [15] GB/T 19963-2011, Technical rule for connecting wind farm to power system[S].
- [16] Sun J, Xu W B, Feng B. A global search strategy of quantum-behaved particle swarm optimization[C]. IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent System. Singapore, 2004: 111-116.

## 作者简介

刘军(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 从事风力发电系统控制策略、无线电能传输、电力系统自动化、智能控制等研究, E-mail: liujun0310@sina.com;

赵晨聪(1991—), 女, 博士生, 从事电网故障下永磁直驱风力发电系统控制策略的研究, E-mail: 237069831@qq.com;

谢宙桦(1991—), 男, 工程师, 从事复杂环境下的工业控制算法的研究, E-mail: 623767502@qq.com;

周飞航(1989—), 男, 博士生, 从事永磁直驱风力发电系统控制策略的研究, E-mail: qq987102679@126.com.

(责任编辑: 李君玲)