

一种提高无功分配精度的下垂控制策略^{*}

余 巧, 张巧杰, 李云侠
(北京信息科技大学 自动化学院, 北京 100192)

摘 要: 针对并联逆变器线路阻抗差异导致的无功功率分配不平均以及环流问题, 提出了一种基于无功功率自适应补偿的改进型下垂控制策略。在传统的电压-无功功率下垂控制的基础上, 引入无功功率的偏差作为补偿量, 通过无功功率的自适应调节, 改善无功功率的分配精度, 实现环流抑制。最后, 在 MATLAB/Simulink 仿真和 NI PXIe-1071 试验平台上进行了验证, 证明改进的下垂控制可以有效地改善无功分配以及较好地抑制环流。

关键词: 无功功率分配; 环流; 下垂控制; 无功偏差

中图分类号: TM 464 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)02-0086-05

doi: 10.12177/emca.2019.138

A Droop Control Strategy for Improving the Sharing Accuracy of Reactive Power^{*}

YU Qiao, ZHANG Qiaojie, LI Yunxia

(School of Automation, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: Considering the unequal sharing of reactive power and the circulating current caused by the difference of line impedance of paralleled inverters, an improved droop control strategy based on adaptive compensation of reactive power is proposed. On the basis of the traditional voltage-reactive power droop control, reactive power deviation is introduced as the compensation amount. After the adaptive adjustment of reactive power, it can effectively improve the accuracy of reactive power sharing and achieve great suppression of circulating current. The improved droop control is verified by the MATLAB/Simulink simulation and NI PXIe-1071 experimental platform.

Key words: reactive power sharing; circulating current; droop control; reactive power deviation

0 引 言

并网逆变器在发电领域的应用广泛, 通常以并联形式运行, 但线路阻抗的差异会使系统的无功功率不能进行合理分配, 造成系统存在环流问题, 增加系统功率损耗, 降低系统工作效率^[1-2]。逆变器并联控制系统通常采用下垂控制策略, 通过电压-无功功率线性特性曲线实现无功功率的有效分配^[3]。但传统下垂控制的响应慢, 难以实

现无功功率均分, 而且对于下垂系数的选择具有一定的局限性^[4-5]。为此, 许多学者对下垂控制策略进行了大量研究, 寻找改进的方法。在传统下垂控制基础上, 文献[6-7]引入虚拟阻抗, 利用系统无功与给定无功的偏差对虚拟阻抗进行调节, 补偿系统线路阻抗的差异, 以实现无功功率均分。文献[8]引入无功补偿环节, 可实现有效的无功分配和环流抑制, 但在无功补偿过程中增加了系统采样的复杂性。文献[9]引入自适应虚拟

收稿日期: 2019-11-01

收到修改稿日期: 2019-11-28

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目(51777012)

作者简介: 余 巧(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为控制理论与控制工程。

张巧杰(1978—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为电力电子与电力传动。

李云侠(1993—), 女, 硕士研究生, 研究方向为控制理论与控制工程。

阻抗,缩小线路阻抗差异,改善无功分配,通过引入电网侧电压反馈,改进下垂特性曲线,减小电压跌落,但该方法的虚拟阻抗设计环节相对复杂。文献[10]先通过增大下垂系数使无功功率达到合理分配,再利用电压偏差的均值补偿压降,一方面提高了无功均分精度,另一方面维持了系统电压,但会增大系统控制难度,如果下垂系数过大,会造成系统稳定性下降。文献[11]分析了逆变器输出无功功率与线路输出阻抗的关系,设计了可变和固定相结合的新型虚拟阻抗,利用实时功率与平均功率的误差调节可变阻抗,实现了系统功率均分,再利用固定阻抗来补偿系统输出固有的压降。

针对逆变器线路阻抗差异造成的无功分配不均的问题,本文提出了一种自适应的改进下垂控制,实时计算无功偏差作为补偿量,对系统下一时刻无功分配进行自适应调节,对无功分配少的逆变单元进行增量补偿,反之则减量补偿。通过调节可以减小无功偏差,提高系统的无功分配精度,同时有效地抑制无功环流。最后进行仿真与试验分析,仿真与试验结果验证了所提控制方法的可靠性。

1 并联系统特性分析

2台逆变器并联的等效电路如图1所示。其中, $Z_n = R_n + jX_n$ ($n=1,2$) 为线路阻抗, Z_L 为系统输出的连接负荷, $U_o \angle 0^\circ$ 、 i_o 分别为输出电压和电流, $U_n \angle \varphi_n$ 、 i_n ($n=1,2$) 分别为逆变器的输出电压和电流。

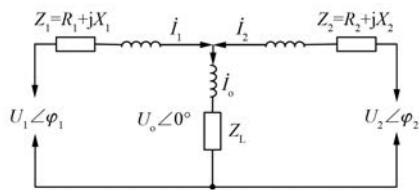


图1 并联逆变器等效电路图

设逆变器输出的有功功率、无功功率分别为 Q_n 、 P_n ($n=1,2$)，当逆变器的线路阻抗呈感性，即满足 $X_n \gg R_n$ 时，则有：

$$P_n = \frac{U_o U_n \sin \varphi_n}{X_n} \quad (1)$$

$$Q_n = \frac{U_o U_n \cos \varphi_n - U_o^2}{X_n} \quad (2)$$

因为实际中相角 φ_n 较小，所以式(1)和式(2)可简化为

$$P_n = \frac{U_o U_n \varphi_n}{X_n} \quad (3)$$

$$Q_n = \frac{U_o U_n - U_o^2}{X_n} \quad (4)$$

从式(3)、式(4)可以看出，逆变器输出的有功功率主要受逆变器的输出电压相角 φ_n 影响，无功功率主要受逆变器的空载输出电压幅值影响，逆变器 P - f 、 Q - U 存在线性关系^[12]。因此，系统可采用 P - f 、 Q - U 下垂控制：

$$f = f_0 - K_p P \quad (5)$$

$$U = U_0 - K_q Q \quad (6)$$

式中： f 、 U 分别为逆变器输出频率、电压； f_0 、 U_0 分别为逆变器的额定频率、额定电压； K_p 、 K_q 为逆变器的下垂控制系数； P 、 Q 分别为逆变器输出的有功功率和无功功率。

当逆变器的线路阻抗不同时，其输出电压存在压差。根据式(4)可知，线路两端存在电压差时会产生无功环流，如果不抑制环流，则会增大线路损耗，甚至造成逆变器损坏^[13]。

2 改进的下垂控制策略

从式(6)可以看出，传统下垂控制的控制效果与下垂控制系数相关，则式(6)可等效为

$$Q = \frac{U_0 - U}{K_q} \quad (7)$$

可得逆变器1、2的无功偏差为

$$\Delta Q = Q_1 - Q_2 = \frac{U_2 - U_1}{K_q} \quad (8)$$

从式(6)~式(8)可以看出，如果下垂系数较小，则系统无功偏差会比较大。增大下垂系数，功率均分会更好，但会增加输出电压的压降，当下垂系数过大还会影响系统的稳定性，说明传统下垂控制存在一定的局限性。

考虑到传统下垂控制的不足，为了更好地实现无功均匀分配，减小无功环流，在传统下垂控制基础上，本文在 Q - U 控制部分引入实时的无功补偿环节。其中，补偿量为 $K_b \Delta Q$ ， ΔQ 为同一时刻的无功偏差， $\Delta Q = Q_1 - Q_2$ ， K_b ($K_b > 0$) 为补偿系数。

改进的 Q - U 下垂控制结构如图 2 所示。

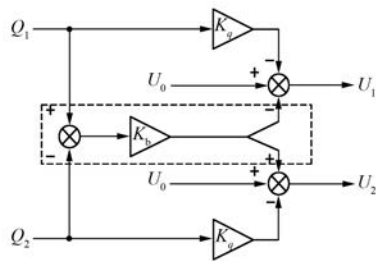


图 2 改进的 Q - U 下垂控制结构

从图 2 可以看出,为了有效调节系统的无功分配,本文设计 2 台逆变器的补偿环节并不是一致的,以 $K_b\Delta Q$ 作为补偿量,逆变器 1 的补偿为负反馈过程,逆变器 2 的补偿为正反馈过程。

当 $\Delta Q > 0$ 时,即 $Q_1 > Q_2$,此时逆变器 1 的无功分配大于逆变器 2,则对逆变器 1 引入的补偿 $-K_b\Delta Q < 0$,为减量过程,相反逆变器 2 进行增量 $K_b\Delta Q > 0$ 补偿;当 $\Delta Q < 0$ 时,同理。通过对逆变器 1、2 引入负、正反馈补偿环节,可自适应调节系统的无功分配,以提高无功分配精度。

系统 Q - U 下垂曲线如图 3 所示。图 3 中,曲线 1 为传统下垂曲线,曲线 2、3 分别为改进后逆变器 1、2 的下垂曲线。

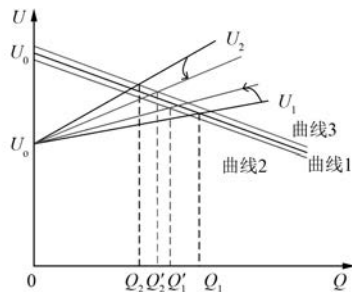


图 3 下垂特性曲线

从图 3 可以看出,改进前后系统的无功偏差分别为 $\Delta Q = Q_1 - Q_2$ 和 $\Delta Q' = Q'_1 - Q'_2$ 。通过无功补偿环节的自适应调节,可以使得逆变器 1、2 的无功分配容量不断接近,无功偏差减小,即 $\Delta Q' < \Delta Q$,说明改进后的下垂控制可以提高无功分配精度。在无功分配改善的同时,逆变器 1、2 的电压偏差也在减小,进而可以减小系统环流。

逆变器 1、2 引入补偿项 $K_b\Delta Q$ 后的无功-电压关系表达式分别为

$$U_1 = U_0 - K_q Q_1 - K_b \Delta Q \tag{9}$$

$$U_2 = U_0 - K_q Q_2 + K_b \Delta Q \tag{10}$$

式(9)与式(10)相减可得:

$$U_1 - U_2 = -K_q \Delta Q - 2K_b \Delta Q \tag{11}$$

通过式(11),可得改进后系统的无功偏差为

$$\Delta Q = \frac{U_2 - U_1}{K_q + 2K_b} \tag{12}$$

对比式(8)和式(12)可以看出,经过无功偏差的补偿后,合理选择补偿系数 K_b ,可以改善系统的无功分配情况,减小无功偏差。

3 仿真与试验分析

为了验证本文所提出的改进策略对逆变器并联系统的无功分配及环流抑制具有改善作用,在 MATLAB/Simulink 平台进行仿真验证,在 NI PXIe-1071 平台进行试验验证。逆变器并联系统参数如表 1 所示。

表 1 逆变器并联系统相关参数

参数名称	参数值
直流母线电压/V	800
滤波电感/mH	1
滤波电容/ μ F	470
逆变器 1 连线电感/mH	1
逆变器 2 连线电感/mH	2
下垂控制系数 K_p	1×10^{-5}
下垂控制系数 K_q	3×10^{-4}
无功偏差补偿系数 K_b	6×10^{-4}

3.1 仿真分析

设定系统负荷为 8 kW+2 kvar,传统下垂控制仿真波形如图 4 所示,改进下垂控制仿真波形如图 5 所示。

当逆变器的线路阻抗 L_1 和 L_2 存在差异时,从图 4(a)可以看出,有功功率最终可以达到均分。从图 4(b)可以看出,无功功率分配偏差较大。系统的无功分配摆动幅度较大,系统的无功分配精度比较低,导致无功偏差较大。过大的无功偏差产生的环流也比较大,从图 4(c)可以看出,系统稳定后的环流幅值约为 1 A,说明传统下垂控制对系统的控制效果较差。

从图 5(a)可以看出,与系统下垂控制一样,系统有功功率基本可以实现 4 kW 的均分;从

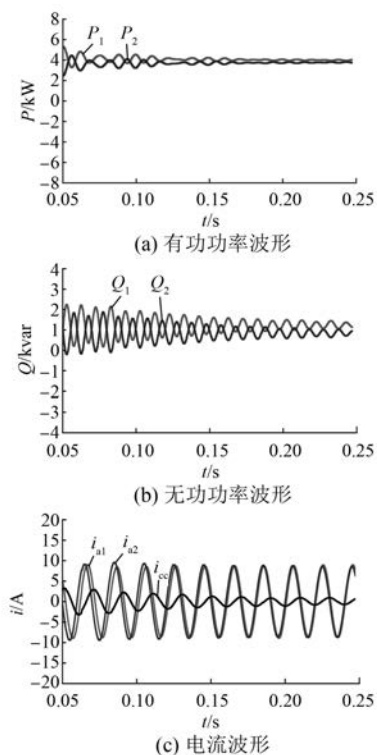


图4 传统下垂控制仿真波形

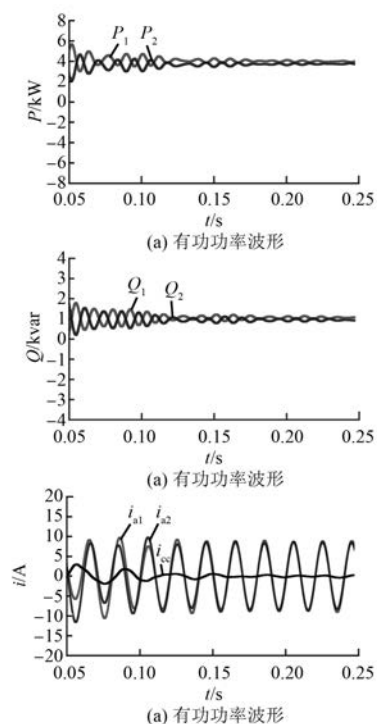


图5 改进下垂控制仿真波形

图5(b)可以看出,经过无功偏差补偿后,无功功

率波形摆动幅度明显降低,无功功率分配得到改善,系统的无功偏差减小,系统稳定后2台逆变器的无功分配值均接近于1 kvar,说明系统无功功率趋于均分;从图5(c)可以看出,系统稳定后环流幅值约为0.4 A,环流抑制效果有了较好的改善。经过仿真分析可知,与传统下垂控制相比,改进后的控制可以更好地改善系统无功分配和抑制环流。

3.2 试验分析

基于NI PXIe-1071平台对逆变器并联系统进行试验,进一步分析验证本文控制策略的正确性和可行性。传统下垂控制试验波形如图6所示。改进的下垂控制试验波形如图7所示。

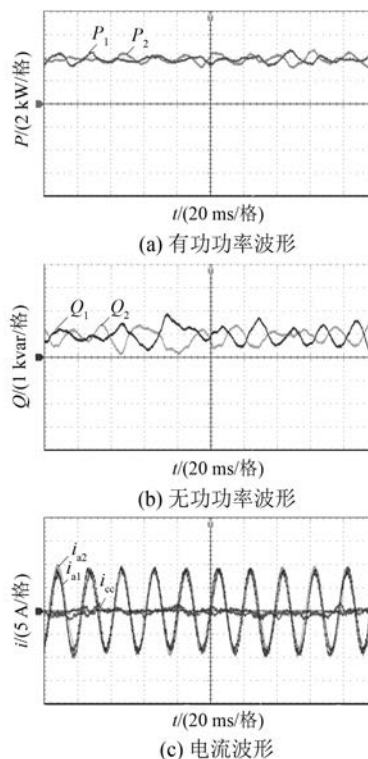


图6 传统下垂控制试验波形

对比图6和图7试验波形可以看出,采用改进下垂控制和传统下垂控制均能较好地实现有功功率均分,但对于无功功率分配的控制效果明显比传统下垂控制优,无功功率基本上可以实现均分,分配精度得到提高。无功偏差的减小,使无功环流也得到了较好的抑制,系统稳定后幅值约为0.5 A,而传统下垂控制下系统环流约为1.0 A。综合上述分析,试验结果与仿真结果基本一致,说

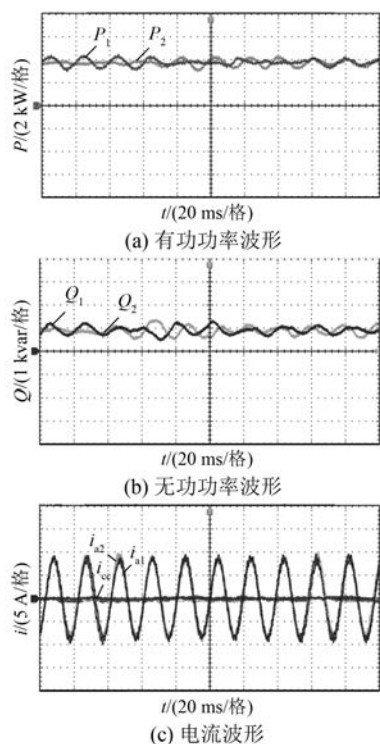


图7 改进下垂控制试验波形

明改进的下垂控制可以提高系统的无功分配精度,且能较好地抑制环流。

4 结 语

针对逆变器并联系统无功功率的分配和环流问题,本文通过分析系统的功率特性和无功功率分配间的关系,提出了一种自适应的改进下垂控制策略。基于 MATLAB/Simulink 仿真和 NI PXIe-1071 试验验证,通过实时计算无功偏差 ΔQ ,以 $K_b \Delta Q$ 作为下一时刻的无功分配的补偿环节进行自适应调节,对于分配少的逆变单元进行增量补偿,分配多的逆变单元进行减量补偿,经过调节后,系统可以减小无功偏差,提高无功分配精度,同时可以有效抑制系统的环流。这说明本文所提改进下垂控制策略具有有效性和一定的理论参

考价值。

【参考文献】

- [1] 吕志鹏,罗安,蒋雯倩,等.多逆变器环境微网环流控制新方法[J].电工技术学报,2012,27(1): 40.
- [2] 樊晨曦,李海峰,AZEDDINE H,等.三相逆变器并联系统中环流抑制的研究[J].智慧电力,2018,46(5): 15.
- [3] 梁海峰,郑灿,高亚静,等.微网改进下垂控制策略研究[J].中国电机工程学报,2017,37(17): 4901.
- [4] 陆善婷,杨敏红,程军照.减小逆变器下垂控制中虚拟阻抗所致电压偏差的方法研究[J].现代电力,2018,35(6): 80.
- [5] 马中静,姜文材.一种应用于直流微电网的改进型下垂控制策略[J].电力电子技术,2015,49(9): 16.
- [6] 李红萍,杨洪耕,曾巧燕,等.孤岛型微电网中改进下垂控制策略[J].电力系统及其自动化学报,2017,29(4): 49.
- [7] 林克文,肖飞,揭贵生,等.基于可变虚拟阻抗的感性逆变器下垂控制[J].海军工程大学学报,2018,30(5): 30.
- [8] 高坤,郑帅峰,辛宁怡,等.基于改进下垂控制的微电网无功控制技术研究[J].电力电容器与无功补偿,2018,39(5): 149.
- [9] 陈杰,刘名凹,陈新,等.基于下垂控制的逆变器无线并联与环流抑制技术[J].电工技术学报,2018,33(7): 1450.
- [10] 李宏俊,王军,孙章,等.一种提高无功功率均分精度的下垂控制器[J].电气传动,2019,49(6): 69.
- [11] 林克文,肖飞,揭贵生,等.引入新型虚拟阻抗的逆变器并联下垂控制策略[J].电器与能效管理技术,2019(1): 55.
- [12] 刘树伟,姚秀萍,王海云,等.基于虚拟阻抗的改进型微电网下垂控制策略[J].四川电力技术,2018,41(3): 6.
- [13] 董杰,李领南,张纯江,等.微电网中的有功功率和无功功率均分控制[J].电力系统自动化,2016,40(10): 90.