

分布式电源逆变器的功率控制

刘向宁 王忠博 牛威
(国网大连供电公司 辽宁省大连市 116001)

摘要: 本文以 DG 为模型, 建立了 PQ 恒功率控制策略, 对 DG 并网逆变器的控制进行讨论, 实现了逆变器有功和无功输出的解耦控制。最后, 借助 MATLAB/SIMULINK 环境对控制效果开展仿真验证。仿真结果证明了该控制策略可准确跟踪有功、无功功率的变化, 充分发挥 DG 本身有功与无功的调节能力, 促进 DG 的高渗透消纳, 发挥 DG 的能效和环境效益。

关键词: 分布式电源 (DG); PQ 恒功率控制; 并网逆变器

以风能和太阳能为基础的分布式电源 (Distibuted Generation, DG) 相对成本较低、技术成熟、可靠性较高, 近年来发展迅猛^[1,2]。与传统的火力发电不同, 各种不同类型的 DG (光伏风电、风电、电池储能等) 可通过电力电子变流器实现并网, 并利用逆变器控制实现对有功功率和无功功率的调节, 在特殊情况下对逆变器采用无功控制为电网提供电压支撑^[3,4]。尤其当 GD 高渗透并网时, 其逆变器的无功调节能力甚至可以完全取代调压电容器。

大量 DG 的接入, 增加了大电网整体的控制难度, 恶化电网的电能质量 (主要指频率和电压), 电网的可靠性将会收到影响。为了降低电网对 DG 接入的敏感性, 由 DG、储能装置、控制中心与用电负荷等构成的微电网应运而生^[5]。其中对 DG 逆变器的有效控制成为关键。

目前, 常用的 DG 逆变器控制多采用 Droop 下垂控制、

V/F 控制、PQ 恒功率控制等控制策略。其中, Droop 下垂控制和 V/F 控制用于 DG 在微电网孤岛运行时使用; 并网运行时, DG 逆变器可采用 PQ 控制策略^[6]。

本文以分布式发电为模型, 讨论在并网运行模式下的 PQ 控制策略, 并在 MATLAB/ SIMULINK 环境下对控制效果进行验证。结果表明该控制策略可实现有功和无功的准确跟踪, 充分发挥 DG 本身有功与无功的调节能力, 促进 DG 的高渗透消纳, 发挥 DG 的能效和环境效益。

1 PQ恒功率控制原理

1.1 三相并网逆变器拓扑结构

本文所涉及的 DG 并网结构如图 1 所示。其中, T1~T6 为三相逆变器桥的 6 个开关管, L 为滤波电感, C 为直流母线电容, R 为包括电抗器电阻在内的每相线路的电阻, u_a 、 u_b 、 u_c 为电网电动势。

1.2 PQ控制原理

在 PQ 控制策略下, 将 u 定义为 DG 内部逆变器并网时的三相基波电压, 则:

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_m \cos \omega t \\ U_m \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ U_m \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, U_m 为相电压的幅值。

对 u 进行 dq0 变换, 可得其在旋转坐标系下的表达式为^[7]:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_0 \end{bmatrix} = T_{abc \rightarrow dq} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_m \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中,

$$T_{abc \rightarrow dq} = \begin{bmatrix} \cos \omega t & \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \omega t & \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

定义, i 为逆变器的输出电流, i_d 、 i_q 分别为 dq0 变换下的 d、

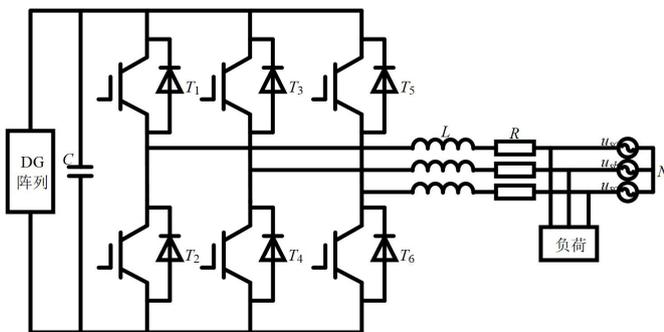


图 1: 三相并网逆变器拓扑结构图

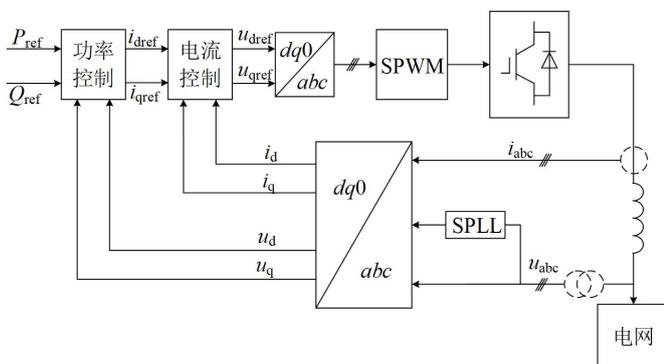


图 2: 并网逆变器 PQ 控制原理

q 轴电流。根据瞬时功率理论，逆变器输出的瞬时有功功率 P 和瞬时无功功率 Q 在 dq0 旋转坐标系中的表达式为：

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2}(u_d i_d + u_q i_q) \\ Q = \frac{3}{2}(u_q i_d - u_d i_q) \end{cases} \quad (4)$$

假设保持逆变器的输出有功功率为 P_{ref} ，无功功率为 Q_{ref} ，根据式 (2) 和式 (4)，可以得到逆变器的参考电流为：

$$\begin{cases} i_{dref} = \frac{2P_{ref}}{3u_d} \\ i_{qref} = \frac{2Q_{ref}}{3u_q} \end{cases} \quad (5)$$

根据式 (5) 知，逆变器产生的瞬时有功功率仅与其输出的 d 轴分量电流有关，而逆变器产生的瞬时无功功率仅与其输出的 q 轴分量电流有关，从而将对逆变器输出功率的控制转化为对电流的控制。如图 2 即为 PQ 控制策略的原理图。

2 PQ恒功率控制模型

图 2 所示的 PQ 控制由功率外环、电流内环以及 SPLL 锁相环构成^[8]。下面分别进行介绍。

2.1 功率外环控制设计

功率外环控制其作用是使得逆变器的输出为参考基准功率，实现无差控制。为了实现无差控制，外环功率控制的控制器通常采用 PI 控制，得到的参考电流表达式为：

$$\begin{cases} i_{dref} = \frac{2}{3u_d}(P - P_{ref})(k_{p1} + \frac{k_{i1}}{S}) \\ i_{qref} = \frac{2}{3u_q}(Q - Q_{ref})(k_{p1} + \frac{k_{i1}}{S}) \end{cases} \quad (6)$$

其中， k_{p1} 和 k_{i1} 分别为功率控制环中 PI 控制器的比例系数和积分系数。

根据式 (6)，可得到功率控制模型结构如图 3 所示。

2.2 电流内环控制设计

将功率控制产生的电流 i_{ref} 作为参考值，输入电流内环中并与反馈电流比较，两者的差值经过 PI 控制器的控制后产生零值稳态误差，实现对电流中非线性扰动的补偿。同时，在电流内环中增加前馈控制，来削弱电网电压对控制效果的影响。

逆变器的电压输出模型在 dq0 旋转坐标系中满足^[9]：

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} LS & -\omega L \\ \omega L & LS \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{dref} \\ u_{qref} \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中，S 为拉普拉斯算子， u_{dref} 和 u_{qref} 分别为逆变器参考输出电压。

由式 (7) 可知，此时的 d、q 轴分量间存在耦合，无法实现对 d、q 轴分量的单独控制。因此，增加前馈解耦控制，

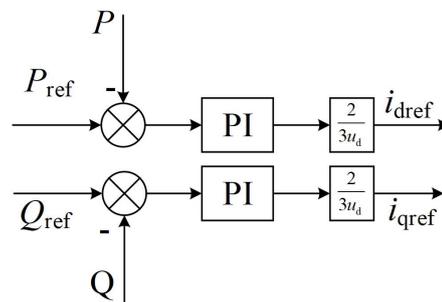


图 3: 功率控制模型

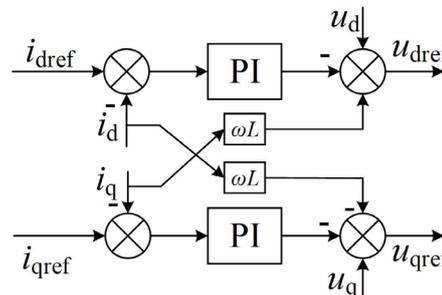


图 4: 电流控制模型

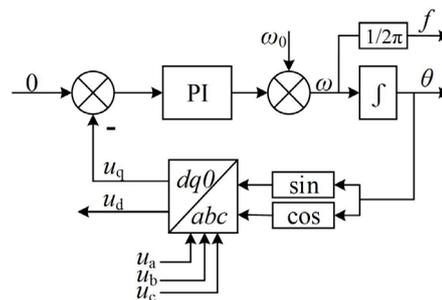


图 5: SPLL 结构模型

消除 d、q 轴分量间的耦合关系。在解耦以及 PI 控制器调节后，逆变器的模型如下所示：

$$\begin{bmatrix} u_{dref} \\ u_{qref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} - (k_{p2} + \frac{k_{i2}}{S}) \begin{bmatrix} i_{dref} - i_d \\ i_{qref} - i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \omega L \\ -\omega L & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中， k_{p2} 和 k_{i2} 分别为电流控制环中 PI 控制器的比例系数和积分系数。

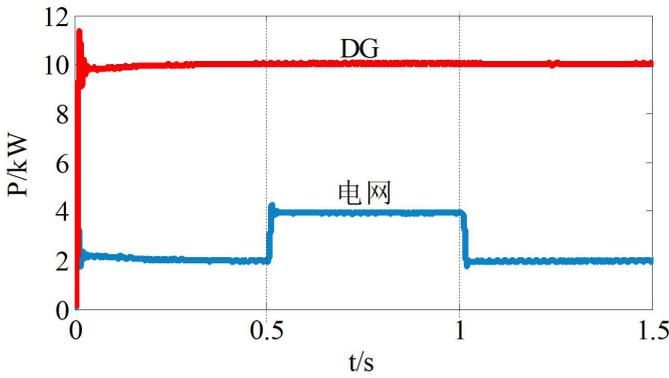
结合式 (7) 和式 (8)，可得：

$$LS \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = (k_{p2} + \frac{k_{i2}}{S}) \begin{bmatrix} i_{dref} - i_d \\ i_{qref} - i_q \end{bmatrix} \quad (9)$$

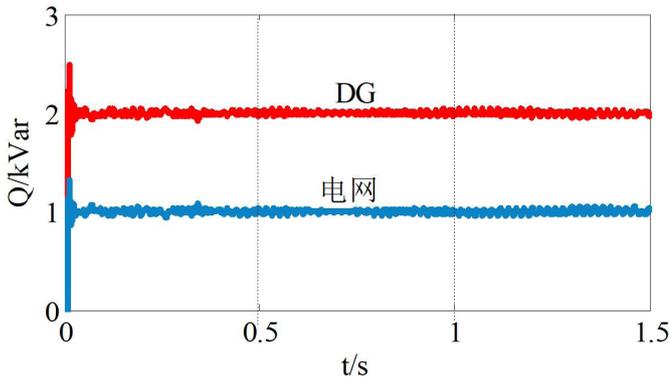
由式 (9) 可见，并网系统的 i_d 和 i_q 实现了解耦，从而可以独立无差地对有功和无功电流进行跟踪控制。

根据式 (8) 可以搭建电流控制模型结构如图 4 所示。

2.3 软件锁相环设计

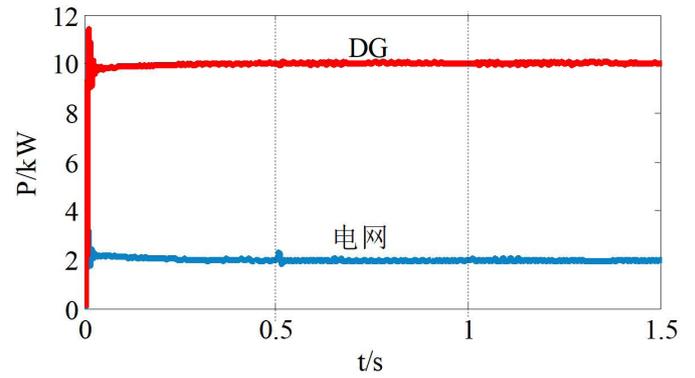


(a) 有功功率曲线

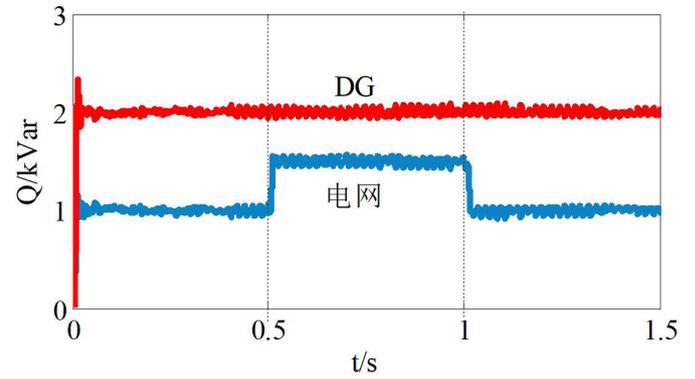


(b) 无功功率曲线

图 6: 增加纯阻性负载, DG 与电网的功率曲线



(a) 有功功率曲线



(b) 无功功率曲线

图 7: 增加纯感性负载, DG 与电网的功率曲线

软件锁相环 (SPLL) 通常被用来检测电压的频率与相位。其具体结构如图 5 所示^[10]。

SPLL 先将电网三相输入电压经 $abc \rightarrow dq0$ 变换后, 得到旋转坐标系下的 d 、 q 轴分量 u_d 和 u_q 。 $abc \rightarrow dq0$ 变换所用参考角度为锁相环的输出 θ , u_q 的大小代表输出电压相位和锁相输出相位之间的差值 (该值在频率完全跟踪的情况下为 0)。 u_q 与 0 相减后的值经过 PI 控制器后, 与初始角频率 ω_0 相加后得到锁相环输出角频率 ω , 再经过一个积分环节后得到最终的输出相位 θ 。整个系统构成一个负反馈, 通过 PI 控制器调节可以达到锁相的目的。

3 模拟分析

为了能够清晰说明 PQ 控制的有效性, 本文借助 MATLAB/SIMULINK 软件, 以图 1 为基础搭建分布式电源并网模型, 以图 2 为基础构建 PQ 控制结构。表 1 给出了本文仿真所用到的参数。

3.1 负载情况下的 PQ 控制

这一小结主要研究 DG 与主网之间的功率交换关系, 为进一步的 DG 并网控制打下坚实的基础。假设系统负载参数如表 2 所示。

3.1.1 增加纯阻性负载

纯阻性负载只消耗有功功率, 而不消耗无功功率, 多为居民负荷性质 (电饭锅, 电炉子、白炽灯等)。假设 0.5s 时, DG 系统增加了 2kW 的纯阻性负载, 1s 后该纯阻性负载切除。图 6 所示为此情况下 DG 发出功率与电网输入功率的曲线图。

通过图 6(a) 可知, 当 DG 的参考有功功率 P_{ref} 恒定不变时, DG 的并网有功功率不会随负载功率变化而变化。图 6(b) 表明有功负载的变化, 不会影响系统无功功率的改变。

由于 DG 发出的有功功率已被完全消纳, 因此由纯阻性负载所引起的功率改变全部由电网来承担。也就是说, 负载所消耗的有功功率由 DG 和电网共同承担。

3.1.2 增加纯感性负载

纯感性负载常见于工厂中的各种电机设备, 这类负载只消耗无功功率而不消耗有功功率。假设 0.5s 时, DG 系统增加了 0.5kW 的纯感性负载, 1s 后该纯感性负载切除。图 7 所示为此情况下 DG 发出功率与电网输入功率的曲线图。

图 7 与图 6 的结论基本类似, 当 DG 产生的无功功率的参考值 Q_{ref} 恒定不变时, 无论负载功率如何变化, DG 所发出的无功功率也不会改变。负载所消耗无功功率也由 DG 和电网共同承担。

表 1: PQ 控制模型参数表

名称	数值	单位
相电压幅值 U_m	220	V
额定频率 f	50	Hz
DG 直流母线电压	800	V
直流母线电容 C	1500×10^{-6}	F
滤波电感 L	0.6×10^{-3}	H
线路电阻 R	0.1	Ω
k_{p1}	5	/
k_{i1}	500	/
k_{p2}	2	/
k_{i2}	300	/

表 2: 负载参数表

负载功率	数值	单位
有功 P_1	12	kW
无功 Q_1	3	kVar

简而言之,当负载的功率大于 DG 所发出的功率时,剩余负荷的功率将由电网承担。反之,如果负载功率小于 DG 所发出的功率时, DG 发出的剩余功率将并入电网,由电网进行消纳。如果高比例的 DG 功率进入电网,将引起电压超限和波动加剧、三相不平衡等大量问题。

4 结论

本文针对目前 DG 的发展趋势,研究了 DG 逆变器的并网控制。基于 DG 逆变器模型,研究了 PQ 恒功率控制策略。借助逆变器输出可控这一优点,实现了有功与无功功率的解耦与跟踪控制,通过对基于 PQ 控制的 DG 并网模型进行仿真分析,可以得到以下结论:

- (1) PQ 控制可以快速准确地跟踪电网频率,保证以 DG 为基础的微电网并网频率与主网同步;
- (2) PQ 控制对系统的参考功率具有较快的响应以及跟踪速度,控制系统稳定,较好的实现了 PQ 恒功率控制的目标;
- (3) 并网运行时, DG 构成的微电网功率优先消纳,缺额功率由电网补足,系统的频率和电压也由电网支撑。

参考文献

[1] 邱晓燕,夏莉丽,李兴源.智能电网建设中分布式电源的规划[J].电网技术,2010(04):7-10.
 [2] 胡叶广,张成,周超英,杜建军,姚英学.太阳能光热发电的集热技术现状及前景分析[J].科学技术与工程,2021,21(09):3421-3427.
 [3] 李克强,韩学山,李华东等.配网中光伏逆变器最优

潮流追踪的分布式算法[J].中国电机工程学报,2019,039(003):711-720.

[4] 薛亚彬.基于 VSG 的分布式电源并网逆变器控制策略[J].数字化用户,2018,024(041):71.
 [5] 袁雪璐.微电网的 PQ 控制研究[J].电气开关,2016(6):1-4.
 [6] 韩培洁,张惠娟,杜强.微电网主/从控制策略的分析研究[J].电器与能效管理技术,2012(014):22-26.
 [7] 董鹤楠,苑舜,李闯,韩子娇,丁惜瀛.基于改进型 P/Q 控制的多源微电网功率脉动抑制[J].沈阳工业大学学报,2020,42(01):7-11.
 [8] 李辉,谭新玉,兰大伟,程俊翔.基于 PQ 控制方法的微电网控制模型与仿真[J].通信电源技术,2016,33(06):7-9+18.
 [9] 方景辉,温镇.分布式光伏就地自适应电压控制策略研究[J].电力系统保护与控制,2015,43(023):49-55.
 [10] 杨文杰.光伏发电并网与微网运行控制仿真研究[D].西南交通大学,2010.

作者简介

刘向宁(1989-),男,辽宁省大连市人。硕士研究生,国网大连供电公司工程师。研究方向为电网规划。
 王忠博(1992-),男,吉林省人。硕士研究生,国网大连供电公司工程师。研究方向为电网调度与电力系统分析。
 牛威(1987-),男,辽宁省沈阳市人。硕士研究生,国网大连供电公司高级工程师。研究方向为电网规划。