

有源滤波与光伏并网发电的统一控制研究

Study on The Control Strategy of The Solar Power Grid With Active Filtering Function

卓放^[1,2], 吴隆辉^[1], 陈哲^[2], 王兆安^[1]

1 西安交通大学电气工程学院, 西安, 中国

2 丹麦奥尔堡大学能源系, 奥尔堡, 丹麦

摘要: 论文分析了电能质量光伏并网系统系统的拓扑结构和工作原理。在此基础上对 PQPV 系统中谐波抑制和光伏并网最大功率跟踪之间的解耦控制进行了研究, 并针对谐波治理过程中负载突变导致系统直流侧电压变化, 进而对最大功率输出造成影响这一问题, 在 PQPV 系统的直流侧电压控制环节中引入了输出电流前馈控制, 解决了负载变化过程中谐波抑制环节对 PQPV 系统最大功率跟踪的影响。最后对所提出的前馈控制方法进行了实验研究并得出相应结论。

关键词: 光伏发电, 电能质量, 并网, 直流侧电压控制, 解耦

近年来, 光伏并网发电作为可再生能源利用的一种重要形式, 其应用越来越广泛。研究发现, 单级型光伏并网逆变器与并联型有源电力滤波器有着相同的主电路结构和电流跟踪控制, 两者只是控制系统输出的指令不同, 如果将有源滤波器的相关技术应用到单级光伏并网系统中, 同时实现并网发电和电能质量治理的功能, 就可以充分发挥装置的作用, 提高装置的利用率。

论文首先分析了电能质量光伏并网系统 PQPV (Power Quality Photovoltaic System) 的拓扑结构、工作原理。在此基础上对 PQPV 系统中谐波抑制和光伏并网最大功率跟踪之间的解耦控制进行了分析, 并针对谐波治理过程中负载突变导致系统直流

侧电压变化, 进而对最大功率输出造成影响这一问题, 在 PQPV 系统的直流侧电压控制环节中引入了输出电流前馈控制, 从而抑制了负载变化过程中谐波抑制环节对 PQPV 系统最大功率跟踪的影响。最后对所提出的前馈控制方法进行了实验研究。

1.1 PQPV 系统的结构及工作原理

所研究的 PQPV 的结构如图 1 所示。

PQPV 系统的主要功能包括两个方面, 一方面是将光伏阵列转换出来的电能馈送至公共电网, 另一方面是对非线性负载产生的谐波进行抑制。

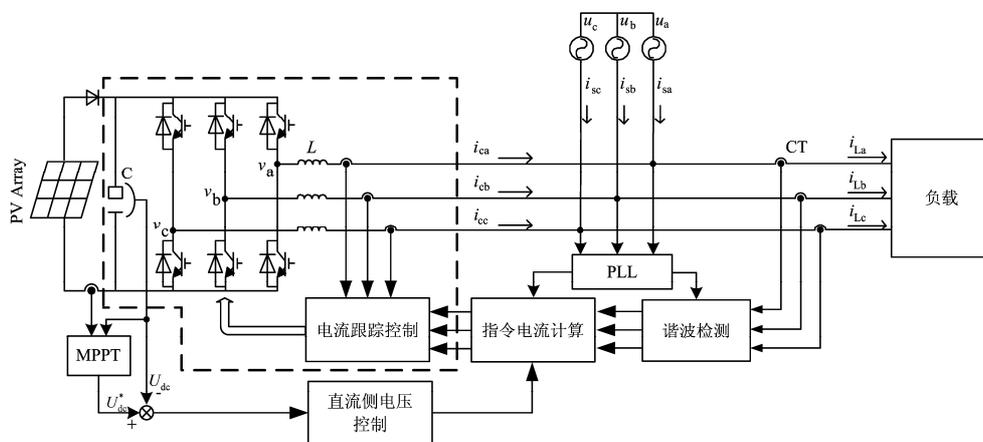


图 1 PQPV 系统结构图

图 1 中, MPPT(Maximum Power Point Tracking) 模块为光伏阵列最大功率跟踪控制单元, 完成太阳能电池阵列最大功率点工作电压 U_{dc}^* 的确定, 并根据光伏阵列输出功率及工作点电压的幅值来识别白天和夜晚, 让系统工作于不同的模式。直流侧电压控制环节用于控制 PQPV 系统直流侧电压, 使其维

持在给定值 U_{dc}^* 。谐波检测单元用于检测补偿对象电流中谐波分量, 由此确定需要补偿的谐波电流。指令电流计算单元将光伏阵列需要输出的有功分量和谐波分量合成, 最终得到系统的并网电流指令值。电流跟踪控制单元使得逆变器的输出电流能够实时、准确地跟踪指令电流信号。

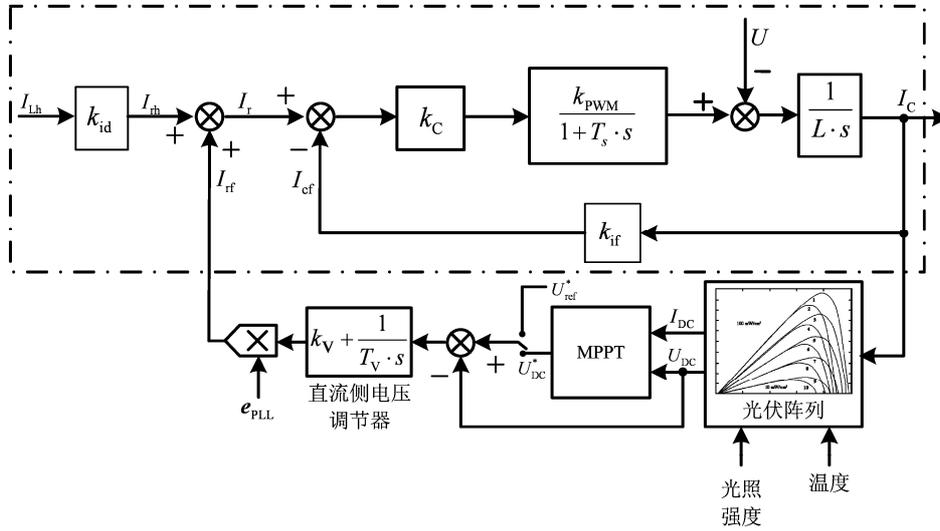


图 2 PQPV 系统等效模型

图 2 所示的模型中, 虚框内为电流内环, 虚框外为电压外环。从图 2 中可以看出, 在认为电压外环输出不变的情况下, PQPV 系统与并联型有源电力滤波器系统 PAPF(Parallel Active Power Filter) 有着相同的电流内环, 因此关于 PAPF 系统电流内环的分析可以完全应用到 PQPV 系统中, 而且 PAPF 系统中关于谐波电流指令 I_{Lh} 的获得方法也可以直接应用到 PQPV 系统中。

通过分析可知, 直流侧电压控制在 PQPV 系统中占据极其重要的地位。图 2 中的直流侧电压调节器通常采用 PI 调节器, 具体设计可采用有源电力滤波器直流侧电压控制器的设计技术。

1.2 最大功率跟踪与谐波抑制的解耦控制

与传统的光伏并网逆变器相比, PQPV 系统需要同时实现并网电能馈送和谐波抑制。目前的

PQPV 系统的控制指令都是通过将最大功率跟踪控制所得的基波有功电流指令与用于谐波抑制的谐波电流指令相加得到。然而两部分指令之间是否存在相互影响却很少有文献分析。

1.2.1 谐波抑制对最大功率跟踪控制的影响

由 PQPV 系统工作原理可以看出, PQPV 系统的输出电流中既包括基波有功电流, 也包括谐波电流, 输出电流中的谐波分量用于补偿非线性负载所产生的谐波电流, 显然输出电流中用于电能馈送的基波有功电流成分不会对该功能造成影响。然而输出电流中的谐波分量是否会对电能馈送功能造成影响呢?

假设三相电压平衡且无谐波, 可以表示为:

$$\begin{aligned} u_a(t) &= U_1 \sin(\omega t) \\ u_b(t) &= U_1 \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ u_c(t) &= U_1 \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{aligned} \quad (1)$$

图 1 所示的 PQPV 系统中, 变流器交直流侧瞬时功率平衡关系可以表示为:

$$u_a(t)i_a(t) + u_b(t)i_b(t) + u_c(t)i_c(t) - R[i_a^2(t) + i_b^2(t) + i_c^2(t)] - \frac{1}{2}L[i_a(t)\frac{d}{dt}i_a(t) + i_b(t)\frac{d}{dt}i_b(t) + i_c(t)\frac{d}{dt}i_c(t)] = U_{dc}(t)C\frac{d}{dt}U_{dc}(t) + P_{PV}(U_{dc}) \quad (2)$$

式中, R 为变流器损耗、电感损耗及线路损耗的等效电阻, U_{dc} 为并网逆变器直流侧电压, $P_{PV}(U_{dc})$ 为光伏阵列输出功率, 并网情况下其由并网逆变器直流侧电压决定, 所以此处将其表示为 U_{dc} 的函数。

式 (2) 中, 各项瞬时功率可以表示为:

1) 三相基波有功电流产生的瞬时功率之和:

$$P_1 = \frac{3}{2}U_1I_1 \quad (3)$$

2) 三相谐波电流产生的瞬时功率之和:

$$P_h = \frac{3}{2}U_1I_k \sum_{k=2}^{\infty} \cos[(k-1)\omega t + \varphi_k] \quad (4)$$

由式 (4) 可见, 三相谐波电流产生的瞬时功率之和不为 0, 而是 $k-1$ 次脉动, 这必然会引起变流器直流侧电压的波动。而如果通过控制来减少、改变或者消除这一脉动造成的直流侧电压波动, 必然会对系统输出的谐波造成影响, 进而影响系统的谐波补偿效果。

消除这一脉动对变流器直流侧影响的办法通常是加大变流器直流电容, 从而使直流侧电压在允许值范围内波动, 这是 PAPF 系统直流侧电容选取的一个重要原则。同时 PQPV 系统在进行直流侧电容选取时, 除满足普通光伏并网逆变器的要求外也必须遵循这一原则, 否则过大的直流侧电压波动会对 PQPV 系统的最大功率跟踪造成影响。后面的分析中将忽略这一分量对变流器直流侧电压的影响。

式 (4) 中, 三相谐波电流产生的瞬时功率之和在一个工频周期内的平均值为零。因此为避免系

统直流侧电压控制对其谐波补偿效果造成影响, 将 PQPV 系统的直流侧电压控制周期定为工频周期。

3) 电阻 R 上的三相瞬时功率之和:

$$P_R = R[i_a^2(t) + i_b^2(t) + i_c^2(t)] = \frac{3}{2}R \left[I_1^2 + \sum_{k=2}^{\infty} I_k^2 \right] \quad (5)$$

4) 电感 L 上的三相瞬时功率之和:

$$P_L = \frac{1}{2}L[i_a(t)\frac{d}{dt}i_a(t) + i_b(t)\frac{d}{dt}i_b(t) + i_c(t)\frac{d}{dt}i_c(t)] = 0 \quad (6)$$

由上述分析可见, 稳态情况下, PQPV 系统功率平衡方程可以表示为:

$$\frac{3}{2}U_1I_1 + \frac{3}{2}R \left[I_1^2 + \sum_{k=2}^{\infty} I_k^2 \right] = U_{dc}(t)C\frac{d}{dt}U_{dc}(t) + P_{PV}(U_{dc}) \quad (7)$$

即光伏阵列的输出功率等于馈送至电网的功率和变流器损耗功率两部分功率之和。

由式 (7) 可以看出, 稳态情况下 PQPV 系统输出基波有功电流和谐波电流的幅值基本保持不变, 从而系统直流侧电压 U_{dc} 保持不变。因此系统谐波抑制功能不会对最大功率跟踪控制造成影响, 两者的控制可以认为是解耦的。

1.2.2 基于输出电流前馈的 PQPV 系统直流侧电压控制方法

根据 PQPV 系统的工作原理, 当补偿对象的谐波发生变化即 PQPV 系统输出谐波电流发生变化时, 只要能够维持 PQPV 系统变流器直流侧电压恒定, 即可保证 PQPV 系统的最大功率输出不受补偿对象谐波发生突变的影响。

将式 (7) 进一步分解为:

$$\frac{3}{2}U_1I_{1,PV} + \frac{3}{2}U_1I_{1,R} + \frac{3}{2}R \left[I_1^2 + \sum_{k=2}^{\infty} I_k^2 \right] = U_{dc}(t)C\frac{d}{dt}U_{dc}(t) + P_{PV}(U_{dc}) \quad (8)$$

其中 I_{1_PV} 表示用于光伏阵列并网逆变的基波有功电流及其所对应的损耗, I_{1_R} 表示用于提供并网逆变器输出谐波电流所对应的损耗。

由式 (8) 可知, 由于 PQPV 系统的直流侧电压控制周期为工频周期, 因此 I_{1_R} 、 I_{1_PV} 最快也只能每个工频周期变化一次, 这期间如果输出电流发生突变, 必然会打破稳态时的功率平衡, 使系统直流侧电压发生变化, 进而影响最大功率输出。

如果可以使 I_{1_R} 能够跟随变流器的损耗变化而变化, 并保证其所提供的有功分量时刻与损耗相等, 即可保证 PQPV 系统在补偿对象谐波发生突变时其直流侧电压维持恒定, 从而使最大功率输出不受影响。因此, 本节提出基于输出电流前馈的 PQPV 系统直流侧电压控制方法, 如图 3 所示。

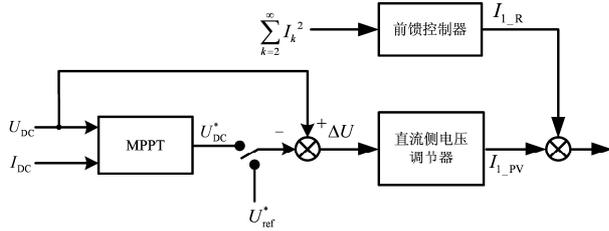


图 3 基于输出电流前馈的 PQPV 系统直流侧电压控制图

图中, 将前馈控制器设计为比例调节器, 其比例系数为:

$$k = -\frac{R}{U_1} \quad (9)$$

则引入前馈控制后, 输出电流中用于提供并网逆变器输出谐波电流所对应损耗的基波电流 I_{1_R} 可以表示为:

$$I_{1_R} = -\frac{R}{U_1} \sum_{k=2}^{\infty} I_k^2 \quad (10)$$

式中 R 为变流器损耗、电感损耗及线路损耗的等效电阻, 可以通过实验的方法得到; U_1 表示并网逆变器端口电压的峰值, 一般认为是定值; I_k 表示 k

次谐波电流的幅值, 该值在进行谐波检测的过程中可以得到。由此可见, 该前馈控制方法不需要增加任何硬件, 简单, 易实现。

引入输出电流前馈后, 输出电流中用于提供并网逆变器输出谐波电流所对应损耗的基波电流 I_{1_R} 不再由直流侧电压控制环节统一得到, 而是由前馈通道决定。因此该部分电流可以及时跟踪 PQPV 系统输出谐波的变化, 从而抑制输出谐波突变对系统直流侧电压的影响。

可见, 引入前馈控制后 PQPV 系统的功率平衡可以不受补偿对象谐波突变的影响, 从而确保了系统谐波抑制功能不会对最大功率跟踪控制造成影响, 两者的控制可以认为是解耦的。

1.2.3 基于输出电流前馈的控制方法的实验研究

为验证 PQPV 系统输出谐波发生突变时, 对 PQPV 系统直流侧电压的影响以及本章所提出的输出电流前馈的直流侧电压控制策略, 在项目研究所研制的实验平台上进行了相关的实验研究。

实验过程中 PQPV 系统同时输出基波电流和谐波电流, 实验中 PQPV 系统输出的基波电流实际是基波无功电流。实验中在 PQPV 工作过程中将非线性负载突然切除, 以实现使 PQPV 系统输出的谐波发生突变。

图 4 为 PQPV 系统工作于稳态情况下的实验波形, 图 4 中 U_{DC} 为 PQPV 系统直流侧电压, I_F 为 PQPV 系统的输出电流。

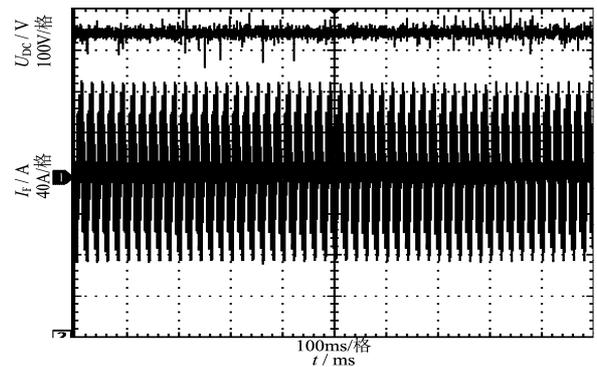


图 4 PQPV 系统工作于稳态情况下的实验波形

图 和图 为 PQPV 系统输出谐波电流突变情况下，未引入前馈控制和引入前馈控制的实验波形，图中 U_s 为 PQPV 系统直流侧电压， I_C 为 PQPV 系统的输出电流。

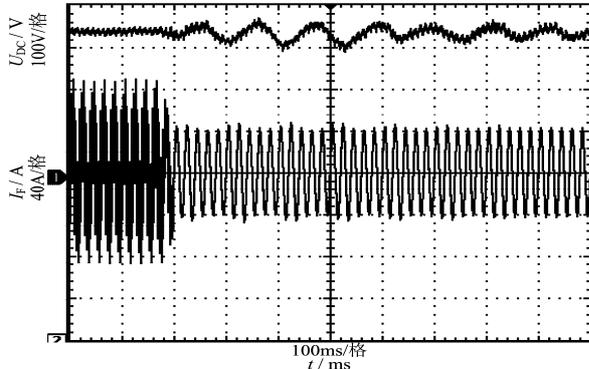


图 5 引入前馈控制前的实验波形

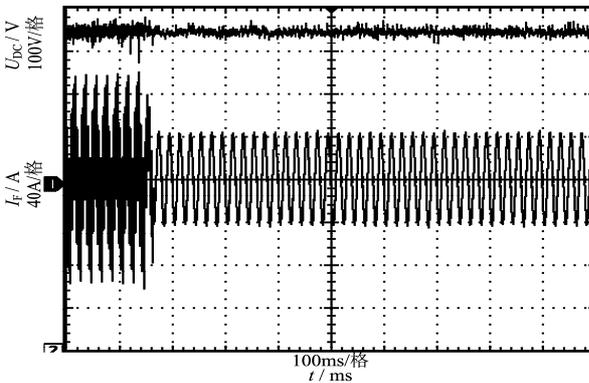


图 6 引入前馈控制后的实验波形

从实验结果可以看出，未引入输出电流前馈情况下，当补偿对象谐波发生突变时（对应实验波形中 PQPV 系统输出谐波突变），PQPV 系统的直流侧电压会发生变化。而引入前馈后，当补偿对象谐波发生突变时，PQPV 系统的直流侧电压都几乎保持不变。

1.3 结论

将有源滤波的相关技术应用到目前世界范围内正在高速发展的光伏并网系统中，构成 PQPV 系统。本研究对 PQPV 系统的拓扑结构、工作原理、以及几种常用的最大功率跟踪控制方法进行了分析。然后分析了系统中谐波抑制和光伏并网最大

功率跟踪之间的解耦控制，并提出了基于输出电流前馈的 PQPV 系统直流侧电压控制方法。最后给出了前馈控制的实验结果。通过本研究分析，可以得出以下结论：

(1) PQPV 系统工作于稳态情况下，系统谐波抑制功能与最大功率跟踪控制之间不会互相影响，两者的控制可以认为是解耦的；

(2) 当补偿对象的谐波发生变化即 PQPV 系统输出谐波电流发生变化时，PQPV 系统的谐波抑制功能会造成系统直流侧电压的波动，进而影响其最大功率跟踪；

(3) 基于输出电流前馈的 PQPV 系统直流侧电压控制方法可以使系统功率平衡不受补偿对象谐波突变的影响，从而确保系统谐波抑制功能不会对最大功率跟踪造成影响，实现了动态情况下谐波抑制与最大功率跟踪之间的解耦控制。同时该方法不需要增加任何硬件，简单，易实现。

注：本论文研究受 2007 年台达环境与教育基金会高级访问学者项目资助，在此表示深切谢意！

参考文献

- [1] Wu L, Zhuo F, Zhang P, et al. Study on the influence of supply-voltage fluctuation on shunt active power filter[J]. Power Delivery, IEEE Transactions on, 2007, 22 (3): 1743-1749.
- [2] 秦杰, 王大为. 有源滤波器与无功补偿装置并联使用技术[J]. 电气技术, 2006, (08): 30-31.
- [3] 罗世国, 侯振程. 有源滤波器直流侧电压闭环控制的稳定性研究[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 1994, (03): 60-68.
- [4] 张超. 光伏并网发电系统 MPPT 及孤岛检测新技术的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [5] Weidong X, Dunford WG. A modified adaptive hill climbing MPPT method for photovoltaic power systems[C]. Power Electronics Specialists Conference, 2004 PESC 04 2004 IEEE 35th Annual, 2004: 1957-1963 Vol.1953.
- [6] Al-Amoudi A, Zhang L. Optimal control of a grid-connected PV system for maximum power tracking and unity power factor[C]. Power Electronics and Variable Speed Drives, 1998 Seventh International Conference on (Conf Publ No 456), 1998: 80-85.
- [7] Chih-Chiang H, Jong-Rong L. Fully digital control of distributed photovoltaic power systems[C]. Industrial Electronics, 2001 Proceedings ISIE 2001 IEEE International Symposium on, 2001: 1-6 vol.1.
- [8] 陈兴峰, 曹志峰, 许洪华, 等. 光伏发电的最大功率跟踪算法研究[J]. 可再生能源, 2005, (01): 8-11.
- [9] Femia N, Petrone G, Spagnuolo G, et al. Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method[J]. Power Electronics, IEEE Transactions on, 2005, 20 (4): 963-973.