

大功率光伏并网逆变器不平衡控制策略研究

张兴¹, 许颇¹, 曹仁贤², 张崇巍¹

(1.合肥工业大学电气与自动化工程学院, 合肥 230009; 2.合肥阳光电源有限公司)

摘要: 针对三相大功率光伏并网逆变器电网电压不平衡运行时网侧电流所产生的畸变,提出了基于正序 d-q 坐标系的抑制并网逆变器网侧负序电流的不平衡控制策略。在研究了电网电压不平衡对光伏并网逆变器运行性能影响的基础上,提出了采用前馈解耦的空间矢量 PWM (SVPWM) 控制算法,仿真和实验表明:该控制策略有效地抑制了电网电压不平衡时光伏并网逆变器的网侧电流畸变,提高了系统运行性能。

关键词: 光伏阵列; 并网逆变器; 不平衡电网; 控制

中图分类号: TM615

文献标识码: A

0 引言

随着太阳能应用技术的发展,光伏发电系统的主流发展趋势无疑将是并网光伏发电。而作为光伏并网发电系统关键装置之一的并网逆变器,其运行性能则直接影响光伏并网发电系统的安全、可靠和高效运行。一般来说,对于户用型中、小功率光伏并网发电系统,其并网逆变器主电路常采用单相拓扑结构,以适配单相电网;而对于集中型大功率光伏并网发电系统,其并网逆变器主电路常采用三相拓扑结构,以适配三相电网。对于三相运行环境,其三相电网的不平衡是难免的,而常规的三相并网逆变器控制系统设计,一般均忽略三相电网的不平衡,即令三相电网是不平衡的。然而,依据三相平衡电网条件所设计的三相并网逆变器,一旦三相电网不平衡,则由于产生非特征谐波,从而使并网逆变器网侧电流产生畸变,这将导致并网逆变器运行性能下降、损耗增大,严重时可使并网逆变器发生故障,甚至烧毁其中的功率模块。因此,研究三相电网不平衡条件下的并网逆变器控制策略,对于三相运行环境下的集中型大功率光伏并网发电系统的安全、可靠和高效运行,无疑有着重要的现实意义。为此,本文在研究了电网电压不平衡对光伏并网逆变器运行性能影响的基础上,提出了采用前馈解耦的空间矢量 PWM (SVPWM) 控制算法,仿真和实验表明:该控制策略有效地抑制了电网电压不平衡时光伏并网逆变器的网侧电流畸变,提高了系统运行性能。

1 电网不平衡时并网逆变器 d-q 模型

三相光伏并网逆变器主电路拓扑结构如图 1 所示。

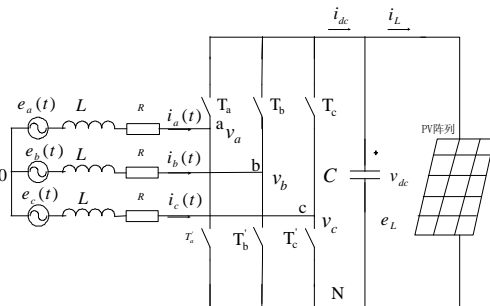


图 1 三相光伏并网逆变器主电路拓扑结构

在复平面静止坐标系 (a, β) 中,三相电网电压复矢量 $\vec{E}_{\alpha\beta}$ 为:

$$\vec{E}_{\alpha\beta} = \frac{2}{3}(e_a + e_b e^{j2\pi/3} + e_c e^{-j2\pi/3}) \quad (1)$$

若三相电网不平衡,则电网电压复矢量存在正、负序分量,显然式 (1) 可改写成同步旋转坐标系 (d, q) 中的复矢量表达式,即

$$\vec{E}_{\alpha\beta} = e^{j\omega t} \vec{E}_{dq}^P + e^{-j\omega t} \vec{E}_{dq}^N \quad (2)$$

式中， ω 为电网电压角频率；分别为同步旋转坐标系（d，q）中电网电压复矢量的正、负序分量，且 $\bar{E}_{dq}^P = e_d^P + je_q^P$, $\bar{E}_{dq}^N = e_d^N + je_q^N$ 。

由式（2）看出：在复平面静止坐标系（ α ， β ）中，电网电压正序复矢量 $e^{j\omega t} \bar{E}_{dq}^P$ 是一模为 $|\bar{E}_{dq}^P|$ 且按逆时针方向以角频率 ω 旋转的空间矢量；而电网电压负序复矢量 $e^{j\omega t} \bar{E}_{dq}^N$ 是一模为 $|\bar{E}_{dq}^N|$ 且按逆时针方向以角频率 ω 旋转的空间矢量。针对图 1 所示并网逆变器主电路拓扑结构，坐标系（ α ， β ）中的复矢量模型方程为：

$$\bar{E}_{\alpha\beta} = \bar{V}_{\alpha\beta} + L \frac{d\bar{I}_{\alpha\beta}}{dt} + R\bar{I}_{\alpha\beta} \quad (3)$$

式中 $\bar{V}_{\alpha\beta}$ 为坐标系（ α ， β ）中并网逆变器交流侧电压复矢量； $\bar{I}_{\alpha\beta}$ 为坐标系（ α ， β ）中并网逆变器交流侧电流复矢量。且

$$\begin{cases} \bar{V}_{\alpha\beta} = \frac{2}{3}(v_a + v_b e^{j2\pi/3} + v_c e^{-j2\pi/3}) \\ \bar{I}_{\alpha\beta} = \frac{2}{3}(i_a + i_b e^{j2\pi/3} + i_c e^{-j2\pi/3}) \end{cases} \quad (4)$$

当电网不平衡时， $\bar{V}_{\alpha\beta}$ 、 $\bar{I}_{\alpha\beta}$ 均含有正、负序分量，类似式（2）可记为：

$$\begin{cases} \bar{V}_{\alpha\beta} = \bar{V}_{dq}^P e^{j\omega t} + \bar{V}_{dq}^N e^{-j\omega t} \\ \bar{I}_{\alpha\beta} = \bar{I}_{dq}^P e^{j\omega t} + \bar{I}_{dq}^N e^{-j\omega t} \end{cases} \quad (5)$$

式中， \bar{V}_{dq}^P 、 \bar{V}_{dq}^N 以及 \bar{I}_{dq}^P 、 \bar{I}_{dq}^N 分别为同步旋转坐标系（d，q）中的并网逆变器交流侧电压、电流正、负序复矢量，且 $\bar{V}_{dq}^P = v_d^P + jv_q^P$, $\bar{V}_{dq}^N = v_d^N + jv_q^N$ ； $\bar{I}_{dq}^P = i_d^P + ji_q^P$, $\bar{I}_{dq}^N = i_d^N + ji_q^N$ 。

联立式（2）、式（3）、式（5），可求出同步旋转坐标系（d，q）中的并网逆变器正、负序复矢量模型方程，即：

$$\begin{cases} \bar{E}_{dq}^P = L \frac{d\bar{I}_{dq}^P}{dt} + R\bar{I}_{dq}^P + j\omega L\bar{I}_{dq}^P + \bar{V}_{dq}^P \\ \bar{E}_{dq}^N = L \frac{d\bar{I}_{dq}^N}{dt} + R\bar{I}_{dq}^N - j\omega L\bar{I}_{dq}^N + \bar{V}_{dq}^N \end{cases} \quad (6)$$

若三相电网不平衡，则并网逆变器视在复功率矢量为：

$$\bar{S} = p + jq = (e^{j\omega t} \bar{E}_{dq}^P + e^{-j\omega t} \bar{E}_{dq}^N) \overline{(e^{j\omega t} \bar{I}_{dq}^P + e^{-j\omega t} \bar{I}_{dq}^N)} \quad (7)$$

式中， $(\overline{e^{j\omega t} \bar{I}_{dq}^P + e^{-j\omega t} \bar{I}_{dq}^N})$ 为 $(e^{j\omega t} \bar{E}_{dq}^P + e^{-j\omega t} \bar{E}_{dq}^N)$ 的共轭复矢量，

p 、 q 为并网逆变器网侧有功、无功功率。

求解式（7）得：

$$\begin{cases} p(t) = p_0 + p_{c2} \cos(2\omega t) + p_{s2} \sin(2\omega t) \\ q(t) = q_0 + q_{c2} \cos(2\omega t) + q_{s2} \sin(2\omega t) \end{cases} \quad (8)$$

式中， p_0 、 q_0 为有功、无功功率平均值； p_{c2} 、 p_{s2} 为 2 次有功余弦、正弦峰值； q_{c2} 、 q_{s2} 为 2 次无功余弦、正弦峰值。

显然，式（8）表明，当三相电网不平衡时，并网逆变器网侧有功、无功功率 p 、 q 均含有 2 次谐波分量，由前面的矢量关系易推得：

$$\begin{cases} p_0 = 1.5(e_d^P i_d^P + e_q^P i_q^P + e_d^N i_d^N + e_q^N i_q^N) \\ p_{c2} = 1.5(e_d^{P,N} i_d^P + e_q^{P,N} i_q^P + e_d^{N,P} i_d^N + e_q^{N,P} i_q^N) \\ p_{s2} = 1.5(e_d^{N,P} i_d^P - e_q^{N,P} i_q^P - e_d^{P,N} i_d^N + e_q^{P,N} i_q^N) \\ q_0 = 1.5(e_d^P i_d^P - e_q^P i_q^P + e_d^N i_d^N - e_q^N i_q^N) \\ q_{c2} = 1.5(e_d^{P,N} i_d^N - e_q^{P,N} i_q^N + e_d^{N,P} i_d^P - e_q^{N,P} i_q^P) \\ q_{s2} = 1.5(e_d^{P,N} i_d^N + e_q^{P,N} i_q^N - e_d^{N,P} i_d^P - e_q^{N,P} i_q^P) \end{cases} \quad (9)$$

将式（9）简记为：

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = M_E \begin{bmatrix} I_{dq}^P \\ I_{dq}^N \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中， M_E 为电网电压相关矩阵。

为抑制电网不平衡对并网逆变器控制性能的影响，根据对并网逆变器网侧有功、无功功率 p 、 q 的不同控制要求，可以求得电网不平衡条件下并网逆变器交流电流控制指令，即：

$$\begin{bmatrix} I_{dq}^{P*} \\ I_{dq}^{N*} \end{bmatrix} = M_E^{-1} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (11)$$

2 抑制并网逆变器网侧负序电流的不平衡控制策略

当电网不平衡时，由于负序电流的存在，使并网逆变器网侧电流畸变，从而影响其运行性能。

为抑制电网不平衡时并网逆变器网侧负序电流，可令网侧负序电流 $i_q^N = i_d^N = 0$ ，并代入式（9），如只考虑有功、无功功率平均值 p_0 、 q_0 的控制，则：

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ q_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} e_q^P & e_d^P \\ -e_d^P & e_q^P \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q^P \\ i_d^P \end{bmatrix} \quad (12)$$

由式（12）易求得正序电流指令：

$$\begin{bmatrix} i_q^{P*} \\ i_d^{P*} \end{bmatrix} = \frac{2}{3[(e_q^P)^2 + (e_d^P)^2]} \begin{bmatrix} e_q^P & -e_d^P \\ e_d^P & e_q^P \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_0^* \\ q_0^* \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中， $(e_q^P)^2 + (e_d^P)^2 \neq 0$ ； p_0^* 、 q_0^* 分别为并网逆变器网侧平均有功、无功功率指令。

显然， p_0^* 与并网逆变器直流电压平均值相关，当直流电压调节器采用 PI 调节器设计时，其 PI 调节器输出与并网逆变器直流电流指令相对应，因此

$$p_0^* = \left[(K_{VP} + \frac{K_{VI}}{s})(v_{dc}^* - v_{dc}) \right] v_{dc}^* \quad (14)$$

式中， K_{VP} ， K_{VI} ——电压调节器比例、积分增益。

另一方面，若要取得单位功率因数控制，可令式（13）中的 q_0^* 为

$$q_0^* = 0 \quad (15)$$

值得一提的是，若按 $q_0^* = 0$ 控制，实际上只能实现并网逆变器网侧平均单位功率因数控制，

即稳态时，并网逆变器网侧无功功率仍然是波动的。联立式 (13) ~ (15)，即得电网不平衡条件下并网逆变器交流电流控制指令 i_q^{P*} 、 i_d^{P*} 。当求得 i_q^{P*} 、 i_d^{P*} 后，可采用同步旋转坐标系 (d, q) 中电流的前馈解耦控制。若电流内环采用 PI 调节器控制，则根据前馈解耦控制规律，并网逆变器网侧正序电压控制指令为

$$\begin{cases} v_q^{P*} = -(K_{iP} + \frac{K_{iI}}{s})(i_q^{P*} - i_q^P) - \omega L i_d^P + e_q^P \\ v_d^{P*} = -(K_{iP} + \frac{K_{iI}}{s})(i_d^{P*} - i_d^P) + \omega L i_q^P + e_d^P \end{cases} \quad (16)$$

式中， K_{iP} ， K_{iI} ——电流调节器比例、积分增益。

为进一步提高动态性能，并抑制电网电压负序分量对并网逆变器网侧电流控制的影响，结合上述控制算法，可加入电网电压负序分量的前馈控制，其控制系统结构如图 2 所示。

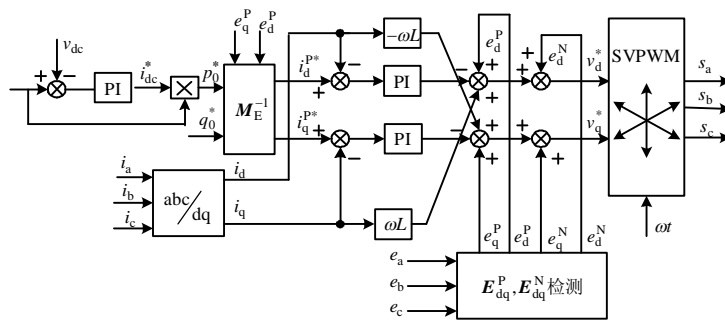


图 2 加入电网电压负序分量前馈控制系统结构图

3 系统试验与结论

为验证理论分析的正确性，以 TMS320F240 DSP 为核心控制器设计了容量为 30KW 的试验样机，当电网幅值不平衡情况时，试验结果如图 3、图 4 所示：

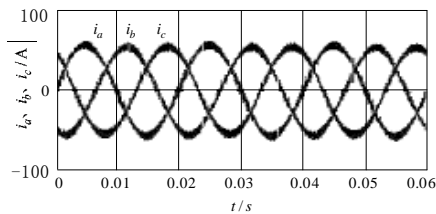
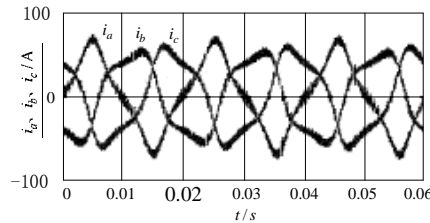


图 3 常规控制时电网三相电流响应波形 图 4 不平衡控制时三相电网电流响应波形

从图 3、图 4 可以看出，当电网幅值不平衡情况时，采用加入电网电压负序分量前馈控制的不平衡控制策略，能有效地抑制了电网电压不平衡运行时光伏并网逆变器的网侧电流畸变，提高了系统运行性能。

[参考文献]

- [1] 张 兴等. 采用电流寻优的 MPPT 光伏阵列并网逆变器的研究[J]. 太阳能学报, 2001, 22(3): 306-310.
- [2] 张 兴, 张崇巍, 曹仁贤. 光伏阵列并网逆变器非线性控制策略的研究[J]. 太阳能学报, 2002, 23(6): 770-773.
- [3] 张崇巍, 张 兴. PWM 整流器及其控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [4] Hong-seok song and Kwanghee Nam. Dual current control scheme for PWM converter under unbalanced input voltage conditions[J]. IEEE Trans. Ind. Electronics, 1999, 46(5) 953-959.

- [5] A. V. Stankovic and T. A. Lipo. A novel control method for input output harmonic elimination of the PWM boost type rectifier under unbalanced operating conditions[J]. IEEE Trans Power Electronics, 2001, 16(5) :603-611.
- [6] R. Naik and N. Mohan. A novel grid interface for photovoltaic, wind-electric and fuel-cell systems with a controllable power factor of operation[C]. Proc. IEEE APEC' 95, vol. 2, 1995, 995-998.

STUDY ON CONTROL STRATEGY OF PHOTOVOLTAIC ARRAY GRID-CONTACTED INVERTER UNDER UNBALANCED POWER SUPPLY CONDITIONS

Zhang Xing¹, Zhang Qiang¹, Cao Renxian², Zhang Chongwei¹

- (1. School of Electric Engineering and Automation , Hefei University of Technology , Hefei 30009, China;
- 2. Hefei Sunlight Power Supply Co., Ltd, Hefei 230011,China)

Abstract: For the problem that there is current distortion in the AC side of three-phase photovoltaic array grid-contacted inverter under unbalanced power supply conditions, an unbalanced power supply control strategy is presented to restrain the negative sequences current based on the d-q positive sequences coordinate axis. After discussing the operating performance of three-phase photovoltaic array grid-contacted inverter under power supply conditions, a feed-forward decoupling SVPWM control algorithm is put forward. Simulated and experimental results show that the current distortion in the AC side of three-phase photovoltaic array grid-contacted inverter under power supply conditions is reduced effectively by the scheme ,and the system operating performance is enhanced.

Keywords: photovoltaic array; grid-contacted inverter; unbalanced power supply conditions,control