-种正负序分离锁相环及其在并网型风力发电 系统中的应用

陈明亮1 肖飞1 刘勇1 王颢雄2 李泉峰3

 (1. 海军工程大学电力电子技术研究所 武汉 430033 2. 大全集团凯帆新能源有限公司 扬中 212200 3. 浙江大学电气工程学院 杭州 310027)

摘要 基于对三相电量进行正负序分离的软件锁相环,采用了正负序级联延时信号消除法, 能够实现对三相电压电流基波正负序分量在同步旋转坐标下的快速提取,并且通过选择不同的参 数,可以滤除指定次数谐波的干扰。该方法无需采用滤波器,从而具备了良好的动态性能。将该 锁相环应用在并网型风力发电系统中,可为系统低电压穿越功能的实现提供快速准确的电网电压 信息以进行正负序控制。仿真和实验均表明该方法能够快速有效地提取三相不对称且畸变情况下 的频率、相位与正负序分量,并且同时具备稳态精确性和动态快速性,为三相并网型风力发电变 流器在电网发生跌落及谐波畸变时的良好运行控制提供保障。

关键词:锁相环 正负序分离 延时信号消除 风力发电 低电压穿越 中图分类号: TM461

A Positive and Negative-Sequence Detection PLL and Its Application in Wind Power Generation System

Chen Mingliang¹ Xiao Fei¹ Liu Yong¹ Wang Haoxiong² Li Quanfeng³ (1. Power Electrical Tech Laboratory, Naval University of Engineering Wuhan 430033 China 2. Daqo Kafan New Energy Resources Ltd. Yangzhong 212200 China 3. College of Electrical Engineering, Zhejiang University Hangzhou 310027 China)

Abstract This paper proposes a novel phase lock loop(PLL) scheme based on positive and negative-sequence cascaded delayed signal cancellation method. The positive and negative sequence components of the fundamental voltage or current in three phase system can be calculated with fast transient response, and any specified harmonic can be eliminated by choosing appropriate parameters. No low-pass filters are needed, and perfect dynamical performance can be achieved. The PLL is used in low voltage ride through control in grid-connected wind power system to provide fast and accurate grid information. Simulation and experimental results show that the frequency, phase angle and positive and negative sequence components can be obtained with fast dynamic response and high precision. The method provides a reliable basis for the control of grid connected PWM converters under asymmetrically distorted three-phase voltages in wind power systems.

Keywords: Phase lock loop(PLL), positive and negative-sequence detection, delayed signal cancellation(DSC), wind power system, low voltage ride through(LVRT)

国家自然科学基金(50737004)和国家重点基础研究发展计划(2012CB215103)资助项目。

收稿日期 2012-02-07 改稿日期 2013-05-10

1 引言

当电网电压发生跌落 或谐波畸变时,要实现对 三相并网型 PWM 电力电子变换器的良好运行控制, 要求变换器系统能够准确、快速地检测出电网电压 的频率、幅值与相位,为控制系统及时提供准确的 相关信息。这就要求锁相环(PLL)具备稳态精确 性和动态快速性, 使控制系统可采取有效措施避免 三相电压不对称引起的过电流和直流侧电压的波动。 如当前在并网型风力发电系统中,当电网出现短路 故障、过负荷或大功率设备 起动时,使电网电压发 生跌落,要求机组至少并网运行某段时间,即低压 穿越。这一要求是因为在风力发电容量大的情况下, 切出大量风电机组会危及电力系统安全和稳定。而 低压穿越实现的首要前提是系统能够准确、快速地 检测出三相不对称电源的频率、相位等重要信息, 之后采取相关算法与措施实现穿越 [1,2]。当非线性 负荷导致电网谐波污染时,也需要避免其对基波正 负序电压、频率、相位和幅值检测的影响。

目前有很多种相位检测和正负序分离方法。过 零点检测法^[3]原理简单,但很容易受到电网电压本 身的畸变和检测电路的各种干扰信号的影响,而且 至少有半个周期的延时。基于单 dq变换以及瞬时 无功功率理论的软件锁相环(SPLL)对三相对称 电压的锁相非常有效^[4-10],但对三相不对称电网和 谐波畸变电压,不能实现正、负序分量的有效分解, 也不能很好地跟踪电网的频率和相位,使系统不能 实现很好的控制性能。自适应锁相环^[11]虽能分别对 电网三相电压的频率、相位和幅值进行跟踪,但算 法复杂。基于双 dq变换的 SPLL 法^[12-14]能得到三 相电量的正、负序分量,但算法中需要采用低通滤 波器,从而难以取得满意的动态性能。

文献[15]提出的基于延时信号消除(Delay Signal Cancellation, DSC)的 SPLL 根据正弦量的半 波对称性,将旋转坐标系下的正序和负序直流量进 行实时抽取。但该方法没有考虑到谐波及频率变化 影响下的处理,本文对该方法进行了扩展,提出了 一种正负序级联延时信号消除法,该方法采用了多 级级联 DSC,对三相电压电流基波正负序分量准确 提取的同时实现了任意次谐波的滤除,由于无需采 用滤波器,该锁相环还同时具备良好的动态性能。

2 双 DQ 分解与 DSC

三相不对称电量可分解为三相正序对称分量、 三相负序对称分量和零序分量。在旋转坐标系中, 三相正序对称分量、三相负序对称分量被变换至以 ω正向旋转的正序同步旋转 d⁺q⁺坐标系和以-ω反 向旋转的负序同步旋转 d⁻q⁻坐标系中。

以电压为例,三相不对称电压的第 *k*相 (*k*∈{a,b,c}) *U*_{sk}可以表示为

$$U_{sk} = U_s^+ \cos\left(\omega t - k\frac{2\pi}{3}\right) + U_s^- \cos\left(-\omega t - k\frac{2\pi}{3} + \varphi_{-1}\right) + U_s^0 \cos\left(\omega t + \varphi_0\right)$$
(1)

式中, 对应 a 相、b 相、c 相, k=0,1,2; U_{s}^{+} 、 U^{-} _s和 U_{s}^{0} 分别为正序分量、负序分量和零序分量的幅 值; φ_{-1} 和 φ_{0} 分别代表负序分量和零序分量的初始 相位。

在常用的三相三线制中,一般不考虑零序分量。 变换至两相 αβ 静止坐标系中,三相电压矢量 U_{αb}可以表示为如下形式:

$$\boldsymbol{U}_{\alpha\beta}(t) = \boldsymbol{U}_{s}^{+} \mathrm{e}^{j\omega t} + \boldsymbol{U}_{s}^{-} \mathrm{e}^{-j(\omega t - \varphi_{-1})}$$
(2)

式中, U⁺_s为正序矢量; U⁻_s为负序矢量。 矢量图如图 1 所示。在两相旋转坐标系中

$$U_{sda}^{+}(t) = U_{s}^{+} + U_{s}^{-} e^{-j(2\omega t - \varphi_{-1})}$$
(3)

$$U_{sda}^{-}(t) = U_{s}^{-} + U_{s}^{+} e^{-j2\omega t}$$
(4)



图 1 三相电压正负序矢量图

Fig.1 Positive- and negative-sequence phasor diagram of three phase voltage

对于基波频率为 50Hz 的三相交流量,在两相

正序旋转坐标系中,正序分量为直流量,负序分量 为100Hz交流量;在负序旋转坐标系中,负序分量 为直流量,正序分量为100Hz交流量。为了消除这 种二次分量,可以采用低通滤波的方法,然而不但 降低了系统的动态性能,还对系统稳定性有影响。 延时信号消除法很好的解决了这个问题。根据正弦 量的半波对称性,DSC将旋转坐标系下的正序或负 序分量的直流量进行实时抽取。变换至静止标系中 后,DSC 正负序分解表达式为

$$\begin{cases} u_{\alpha\beta}^{+}(t) = 0.5 \left[u_{\alpha\beta}(t) + j u_{\alpha\beta}\left(t - \frac{T}{4}\right) \right] \\ u_{\alpha\beta}^{-}(t) = 0.5 \left[u_{\alpha\beta}(t) - j u_{\alpha\beta}\left(t - \frac{T}{4}\right) \right] \end{cases}$$
(5)

式中,T为基波周期。

利用上述 DSC 算法和软件锁相环可以实现对三 相信号不对称电量的频率、相位与正负序分量提取。 在实际应用中该软件锁相环通常会受到各次谐波的 干扰,因此本文采用了 正负序级联 DSC 进行谐波 消除。

3 正负序级联 DSC 及其谐波消除原理

在两相正序旋转坐标系中,正序分量为直流量, 负序分量为频率为两倍基波频率的交流量。对于谐 波分量来讲, n 次谐波则变成了 n-1 倍基波频率的 交流量,即三相静止坐标中的 n 次谐波矢量 Uⁿ_{abc}在 正序旋转坐标系中为 Uⁿ⁻¹。这些正序旋转坐标系中 的谐波分量依然是正弦量并且具备半波对称性,因 此同样可以利用 DSC 法进行消除。n-1 倍基波频率 的交流量需要在正序旋转坐标系中将其和延时 T/2(n-1)的量进行相加,以达到消除该次谐波的目的。 比如说要消除 5 次谐波,变换到正序旋转坐标系后, 5 次谐波变成了 4 次谐波分量,然后将变换量和本 身延时 T/8 的量进行相加即可。表示为通用方法 为

$$DSC\left[U_{dq+}^{n-1}\right] = \frac{1}{2}\left[U_{dq+}^{n-1}(t) + U_{dq+}^{n-1}\left(t - \frac{T}{2(n-1)}\right)\right] \quad (6)$$

相反,在两相负序旋转坐标系中,负序分量为 直流量,正序分量为频率为两倍基波频率的交流量。 对于谐波分量来讲, n次谐波则变成了 n+1 倍基波 频率的交流量。因此同理可以得到消除负序旋转坐 标系中 n 次谐波的通用方法。

$$DSC\left[U_{dq^{-}}^{n+1}\right] = \frac{1}{2}\left[U_{dq^{-}}^{n+1}\left(t\right) + U_{dq^{-}}^{n+1}\left(t - \frac{T}{2(n+1)}\right)\right] \quad (7)$$

因此,为了达到 消除正负序旋转坐标系中各次 谐波的目的,可以针对不同的谐波次数采用不同的 DSC 算法,也就是级联 DSC 算法。理论上来讲, 级联 DSC 算法可以达到消除所有整数次谐波的目的, 在实际应用中,一般可以根据实际情况进行某些特 定谐波次数的消除。

考虑到延时对整个锁相环系统动态响应与稳定性的影响,一般需要将旋转坐标系下的级联 DSC 算法转换到两相 αβ 静止坐标系中。通过反派 克变换可以得到静止坐标系中 *n* 次谐波消除的正 负序 DSC 算法

$$DSC\left[U_{\alpha\beta+}^{n}\right] = \begin{bmatrix} DSC_{n}(\alpha) \\ DSC_{n}(\beta) \end{bmatrix}_{POS} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \alpha + \alpha \left(t - \frac{T}{n_{1}}\right) \cos\left(\frac{2\pi}{n_{1}}\right) - \beta \left(t - \frac{T}{n_{1}}\right) \sin\left(\frac{2\pi}{n_{1}}\right) \\ \beta + \beta \left(t - \frac{T}{n_{1}}\right) \cos\left(\frac{2\pi}{n_{1}}\right) + \alpha \left(t - \frac{T}{n_{1}}\right) \sin\left(\frac{2\pi}{n_{1}}\right) \end{bmatrix}$$
(8)

$$DSC\left[U_{\alpha\beta-}^{n}\right] = \begin{bmatrix} DSC_{n}(\alpha) \\ DSC_{n}(\beta) \end{bmatrix}_{NEG}^{NEG} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \alpha + \alpha \left(t - \frac{T}{n_{2}}\right) \cos\left(\frac{2\pi}{n_{2}}\right) + \beta \left(t - \frac{T}{n}\right) \sin\left(\frac{2\pi}{n_{2}}\right) \\ \beta + \beta \left(t - \frac{T}{n_{2}}\right) \cos\left(\frac{2\pi}{n_{2}}\right) - \alpha \left(t - \frac{T}{n}\right) \sin\left(\frac{2\pi}{n_{2}}\right) \end{bmatrix}$$
(9)

式中, $n_1=2(n-1)$, $n_2=2(n+1)$ 。

事实上,并不需要针对每次谐波进行 DSC 级 联算法,因为根据正弦波的半波对称性和周期性, 对 *n* 次谐波进行延时消除的同时, (2*k*+1) *n* 次谐波 也同时消除了(*k* 为任意整数)。因此可以列出几 个 *n*₁、*n*₂ 的取值对应的正负序谐波消除次数 见下表。

表 不同参数取值对应的正负序可消除谐波次数 Tab. under appropriate parameters

	ruo: unuer uppropriate parametero						
正序	n_1	2	4	8	16		
	谐波/次	2 <i>k</i> +2	4 <i>k</i> +3	8 <i>k</i> +5	16 <i>k</i> +9		

)

负序	n_2	2	4	8	16
	谐波/次	2k	4 <i>k</i> +1	8 <i>k</i> +3	16 <i>k</i> +7

4 正负序级联 DSC在风力发电系统低压

穿越控制中的应用

风力发电系统低压穿越能力(LVRT)是指风 电机组在并网点电压跌落时能够保持并网运行,并 向电网提供无功电流,支持电网电压恢复的能力。 风电机组实现 LVRT 的关键之一在于网侧变流器的 不对称运行控制。

在不对称运行时,为消除直流电压 中 2 次谐波, 可以采用正、负序双电流内环控制。正负序级联 DSC 算法锁相环能可为该控制方案提供电网电压不 对称信息,同时也可用于三相电流的正负序分解, 该锁相环既具备快速准确的动态性能,也能滤除谐 波干扰。

假设电网电压跌落发生时,三相电网电压不对称且含有 5 次、7 次谐波。这样,对于正序同步旋转坐标系下 d+q+分量的而言,将含有 4 次、6 次谐波;而对于负序同步旋转坐标系下 dq 分量的而言,将含有 6 次、8 次谐波。

根据表,在正序中,要消除负序分量和 5次、 7次谐波, n₁取4和8即可;在正序中,要消除正 序分量和5次、7次谐波, n₂取4和16即可。同 时考虑到电压频率变化的影响,需要将电压频率实 时反馈至 DSC 算法,以保证延时算法的准确性。因 此可以设计如图 2 所示的基于级联 DSC 算法的软 件锁相环。



图 2 基于级联 DSC 算法的软件锁相环 Fig.2 SPLL based on cascaded DSC 该软件锁相环的开环传递函数为

$$G_{\rm o}(s) = U_{\rm sd}^+ k(s) \frac{1}{s} \tag{10}$$

式中, SPLL 的闭环传函为
$$G(s) = \frac{\theta'(s)}{\theta(s)} = \frac{U_{sd}^+ k(s)}{s - U_{sd}^+ k(s)}$$

将
$$k(s) = k_p + \frac{k_i}{s}$$
代入,即得

$$G(s) = \frac{\theta'(s)}{\theta(s)} = \frac{U_{sd}^+(k_p + \frac{k_i}{s})}{s - U_{sd}^+(k_p + \frac{k_i}{s})} = \frac{U_{sd}^+k_p s + k_i}{s^2 - U_{sd}^+k_p s - U_{sd}^+k_i}$$

根据控制理论,即可设计 SPLL 的 PI 参数。

利用基于级联 DSC 算法的软件锁相环实现电网 电压的正负序分离且消除谐波干扰后,即可用于 并 网变流器的正、负序双电流内环控制,控制原理图 如图 3 所示。





5 仿真研究

对正负序级联 DSC 在三相电压谐波注入以及不 对称跌落时的正负序抽取进行分析。 图 4 所示为 *t*=0.5s 时,在三相电压中注入峰值 100V 的 5 次、 7 次谐波,在时刻 *t*=0.56s 时,B 相跌落 50%。从 图 4 中的相位及正负序分量的波形可看出,锁相环 的输出相位非常稳定,三相电压基波的正序、负序 分量和频率在一个电源周期内基本稳定,正序、负 序分量基本上没有谐波,在三相电压发生跌落时, 保持良好的锁相特性并快速准确地分解出正序、负 序电压分量。





图 4 谐波注入及不对称跌落时的正负序分解

Fig.4 Positive- and negative-sequence detection result of unbalanced voltage with harmonics

6 实验研究

将正负序级联 DSC 用于并网型直驱风力发电变 流器的控制,对三相电压对称和不对称跌落情况下 全功率变流器的控制进行了实验研究。

实验系统为 2MW 直驱式风力发电系统,系统 组成如图 6 所示。电网电压为 690V,利用电压跌 落发生设备在网侧变压器高压侧通过电抗器分压产 生不同程度的对称和不对称电压跌落。变流器通过 实时检测电网电压的变化信息并对系统功率进行控 制,在跌落幅值较大而造成功率无法完全输送至电 网时,则通过制动电阻将多余的能量消耗掉,保证 电压跌落期间风电机组不脱网运行。 with 20% balanced voltage dip 变流器采用 DSP 控制器进行控制,可通过串口 将电压正负序抽取结果送到上位机进行实时显示。 同时利用示波器观察系统电压电流波形。

图 6 电压对称跌落 20%正负序分解

Fig.6 Positive- and negative-sequence detection result

图 6 所示的 u_{abc} 为电网三相电压,在 4.68s 处 发生 20%对称跌落,该电压信号经过采样和正负序 分解送至上位机进行实时监控如图 5 所示。利用前 述控制方法对变流器进行控制,三相电流波形 i_{abc}如图 6 所示。

图 9 所示的 u_{abc}为电网三相电压,在 4.62s 处 发生单相 20%不对称跌落,该电压信号经过采样和 正负序分解送至上位机进行实时监控如图 8 所示。 利用前述控制方法对变流器进行控制,三相电流波 形 i_{abc}如图 7 所示。





- 图 5 对称跌落时变流器网侧三相电压和电流
- Fig.5 Grid-side three phase voltage and current of converter with balanced voltage dip

图 7 单相不对称跌落时变流器网侧三相电压和电流 Fig.7 Grid-side voltage and current of converter with unbalanced three phase voltage dip



图 8 电压单相不对称跌落 20%正负序分解 Fig.8 Positive- and negative-sequence detection result with 20% unbalanced single phase voltage dip 从实验波形可看出,基于 正负序级联 DSC 设 计的锁相环能够很好地实现对不对称畸变电源相关 信息的有效提取,并能有效的应用于并网型直驱风 力发电变流器的控制,实现了低 电压穿越。

7 结论

本文提出了一种正负序级联延时信号消除法, 分析了该方法对三相电压电流基波正负序分量的提 取原理,给出了滤除谐波干扰的参数选择方法。仿 真和实验均表明该方法同时具备稳态精确性和动态 快速性,能够快速有效地提取三相信号不对称且畸 变情况下的频率、相位与正负序分量。基于方法的 锁相环成功应用于三相并网型全功率风力发电变流 器的低压穿越功能实现。

参考文献

- [1] Chong H Ng, Li Ran, Jim Bumby. Unbalanced- gridfault ride-through control for a wind turbine inverter[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2008, 44(3): 845-856.
- [2] Marius Fatu, Cristian Lascu, Gheorghe Daniel Andreescu. Voltage sags ride-through of motion sensorless controlled PMSG for wind turbines[C]. Industry Applications Conference, 42nd Institute for Adranced studies Annual Meeting, Conference, 2007:

171-178.

- [3] Choi J W, Kim Y K, Kim H G. Digital PLL control for single-phase photovoltaic system[J]. IEEE Proceedings of Electric Power Applications, 2006, 153(1): 40-46.
- [4] Yazdani D, Mojiri M, Bakhshai A, et al. A fast and accurate synchronization technique for extraction of symmetrical components[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(3): 674-684.
- [5] Yazdani D, Bakhshai A, Joos G, et al. A nonlinear adaptive synchronization technique for gridconnected distributed energy sources[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(4): 2181-2186.
- [6] Rolim L, Costa da D, Aredes M. Analysis and software implementation of a robust synchronizing PLL circuit based on the pq theory[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(6): 1919-1926.
- [7] Timbus A, Teodorescu R, Blaabjerg F, et al. Synchronization methods for three phase distributed power generation systems, an overview and evaluation[C]. Proceedings of IEEE 36th Power Electronics Specialists Conference, 2005, 6: 2474-2481.
- [8] 龚锦霞, 解大, 张延迟. 三相数字锁相环的原理及性 能[J]. 电工技术学报, 2009, 24(10): 94-99.
 Gong Jinxia, Xie Da, Zhang Yanehi. Principle and perforrace of the three-phase digital phase-locked loop[J]. Transactions of China Electrotechnieal Society, 2009, 24(10): 94-99.
- [9] Masoud Karimi Ghartemani, Reza Iravani M. A method for synchronization of power electronic converters in polluted and variable-frequency environments[J]. IEEE Transactions on Power Systems, August 2004, 19(3): 1263-1270.
- [10] Akagi H, Kanazawa Y, Nabae A. Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits[C]. Proceedsings of International Pharmaceutical Excipients Council, Tokyo, 1983: 1375-1386.
- [11] Dragan Jovcic. Phase locked loop system for facts[J].IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18 (3): 1116-1122.
- [12] Rodriguez P, Pou J, Bergas J, et al. Decoupled double synchronous reference frame PLL for power

converters control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(2): 584-592.

[13] 周鹏,贺益康,胡家兵. 电网不平衡状态 下风电机 组运行控制中电压同步信号的检测 [J]. 电工技术学 报,2008,23 (5): 108-113.
Zhou Peng, He Yikang, Hu Jiabing. Detection of voltage synchronization signals for a wind energy

generation system unbalanced grid conditions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23 (5): 108-113.

[14] 王颢雄,马伟明,肖飞,等.双 dq 变换软件锁相环的精确模型研究 [J]. 电工技术学报,2011,28(7):90-96.

Wang Haoxiong, Ma Weiming, Xiao Fei, et al. Study of model of software phase locked-loop based on dual-dq synchronous transform[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 28(7): 90-96.

[15] Svensson J, Bongiorno M, Sannino A. Practical implementation of delayed signal cancellation method for phasesequence separation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22, (1): 18-26.

作者简介:陈明亮 男,1978年生,博士,副研究员,研究方向为 风力发电变流器技术。肖飞 男,1977年生,博士,教授,研究 方向为大功率电力电子变换技术。