

电压不平衡跌落时动态电压恢复器的快速 PLL 策略

胡军¹, 曹军威², 张少杰², 杨洁², 袁仲达², 胡子珩³, 姚森敬³, 张华赢³

(1. 浙江清华长三角研究院杭州分院, 杭州 310019;

2. 清华大学信息技术研究院, 北京 100084; 3. 深圳供电局有限公司, 广东 深圳 518048)

摘要: 传统的 PLL 算法不能满足动态电压恢复器 (DVR) 在三相电压不平衡故障时的快速准确锁相要求。本文在分析传统 PLL 的基础上, 提出 $d\alpha\beta$ -PLL 和“推演顺接”相结合的锁相策略。新的锁相策略在一个周期之内基于历史数据进行推演并锁定相位; 一个周波之后采用 $d\alpha\beta$ -PLL 来锁定相位。仿真结果与样机试验证实了, 新型 PLL 锁相策略在三相电压不平衡跌落故障时能够快速准确锁相, 可满足 DVR 的使用要求。

关键词: DVR 软件锁相; 不平衡电压跌落; DVR 锁相策略; 三相 PLL

A Fast PLL Algorithm for Dynamic Voltage Restorer During Voltage Imbalance Sag

HU Jun¹, CAO Junwei², ZHANG Shaojie², YANG Jie², YUAN Zhongda², HU Ziheng³, YAO Senjing³, ZHANG Huaying³

(1. Yangtze Delta Region Institute of Tsinghua University, Hangzhou Branch, Hanzhou 310019, China;

2. Research Institute of Information Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Shenzhen Power Supply Corporation, Shenzhen, Guangdong 518048, China)

Abstract: Traditional PLL algorithms cannot satisfy the requirement of a dynamic voltage restorer (DVR) for speed and accuracy during three-phase voltage imbalance sag. Based on analysis of traditional PLL algorithms, this paper proposed a novel PLL strategy which combines the $d\alpha\beta$ -PLL algorithm with a phase prediction method using historical data. During the first cycle of a fault, the phase angle is estimated from the recorded voltage just before the fault occurred; and after the first cycle, the estimated values of $d\alpha\beta$ -PLL are then used for the phase angle estimation. The simulation results and prototype test verified the proposed PLL strategy is capable to achieve fast phase-locking during three-phase voltage imbalance sag.

Key words: soft PLL for dynamic voltage restorer (DVR); voltage imbalance sag; phase-locked loop; three-phase PLL

0 引言

随着国内工业经济的大规模发展, 大容量、高精度的生产设备应用越来越多, 电能质量问题也越来越受到人们的重视。电能质量问题造成的最直接影响就是产品正常生产遭到破坏, 给厂家带来巨大经济损失。电能质量问题中, 电压暂降问题尤为突

出^[1]。动态电压恢复器(dynamic voltage restorer, DVR)在电压暂降问题治理中正在得到广泛应用^[2]。

在 DVR 设计中, 一般要求在 5 ms 内实现负载电压补偿^[3]。当 DVR 在计算补偿电压时, 首先需要得到的是电压的相位信息^[4-6]。获得相位信息的方法主要有: 反馈滤波器法、离散傅里叶法、希尔伯特变换法以及锁相环法 (phase locked loop, PLL), 其中锁相环应用最多^[7-8]。

对于一个对称的三相系统, 软件锁相算法可以同时采样到三相电压 U_a 、 U_b 、 U_c , 此时电网频率和

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (0000000); 南方电网公司科技项目 (K-SZ2012-026)。

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China (0000000); the Science and Technology Projects (K-SZ2012-026) .

幅值不变,可利用单同步旋转锁相法构造二元方程,计算解出电网的幅值与相位。当发生电压暂降故障时,三相电压不平衡、谐波和相移等工况均会发生。当三相电压不平衡跌落时,在单同步旋转锁相法中负序分量转化成 2 次谐波分量,在计算中很难滤除,造成锁相环输出的相位和实际相位差异较大,不能正确锁相^[9]。

文献[10-12]提出了基于双 dq 变换的软件锁相环(DDSRF-PLL)和 T1/4 延时正负序分离锁相法,以及基于频率和初相角解耦检测的锁相方法,均需要 5 ms 以上才可锁相成功。文献[13]提出了 SPLL-LES 锁相算法,虽然最快可达到 2 ms 实现锁相,但算法非常复杂,不利于工程实现。本文采用 $\alpha\beta$ -PLL 和“推演顺接”相结合的锁相策略,可以实现在三相不平衡电压跌落、含谐波和相移等复杂工况下 5 ms 以内成功锁相,能满足 DVR 对响应速度快、锁相准确、输出稳定的高要求。

1 PLL 算法分析

单同步锁相算法主要包括: dq-PLL 和 $\alpha\beta$ -PLL 算法,下面对这两种方法进行分析。

1.1 dq-PLL 锁相环

1.1.1 dq-PLL 原理

dq-PLL 直接追踪正序电压分量,具有算法简单,相应速度快等优点^[14]。其基本原理是,将 abc 三相坐标系下的电压转换到两相静止 $\alpha\beta$ 坐标系下,再变换到与 abc 同步旋转的两相 dq 坐标系中。经过两次坐标变换,并控制 q 轴分量为 0,即可实现正序电压锁相。电压转换矢量如图 1 所示。

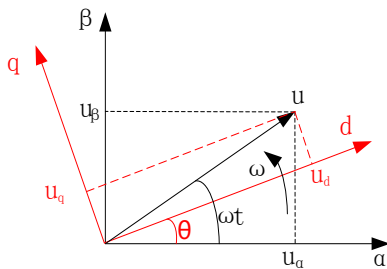


图 1 dq-PLL 电压转换矢量图

Fig. 1 voltage vector diagram for dq-PLL frame transformation

图 1 中, u 为三相电压合成矢量, ω 为电压旋转角频率, θ 为 d 轴与 α 轴夹角。

根据图 1,由瞬时无功理论,按照 Clack 和 Park 变换,可以得到 U_d 和 U_q 电压表达式,即:

$$\begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix} = U \begin{bmatrix} \cos(\omega t - \theta) \\ \sin(\omega t - \theta) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 U 为电压幅值,其余参数含义可参见图 1。

不难看出,实现锁相的目的就是要把旋转坐标 d 轴和电压合成矢量重叠并同步旋转。在锁相完成之前, dq 轴分量都是正弦交变量。当锁相完成时, $\omega t = \theta$, 此时, $U_d = U$ 是一直流分量,而 $U_q = 0$ 。所以从控制过程来看,只要保证 $U_q = 0$ 即可实现锁相。

1.1.2 dq-PLL 控制策略

根据以上分析,为实现锁相成功,需要保证 $U_q = 0$ 。在控制算法中,先把 U_q 的目标值设定为 0,把锁相环的输出值 θ 作为反馈量计算出实际 U_q ,与目标给定值(0)相减得到误差信号,再经过 PI 调节,得到频率误差 $\Delta\omega$ 。把 $\Delta\omega$ 与理论角频率相加,计算出实际角频率,经过一积分环节,最后得到电网电压相位的估计值 θ_{dq} 。当控制量 U_d 调节为 0 时,估计值 θ_{dq} 就与实际电压的相位一致,也就成功锁相。dq 的控制框图可以用图 2 表示。

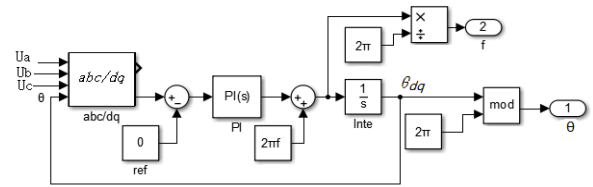


图 2 dq-PLL 控制框图

Fig. 2 block diagram of dq-PLL

dq-PLL 具有原理简单,响应速度快等优点,但在动态过程中频率超调比较严重,系统稳定性差。

1.2 $\alpha\beta$ -PLL 锁相环

1.2.1 $\alpha\beta$ -PLL 原理

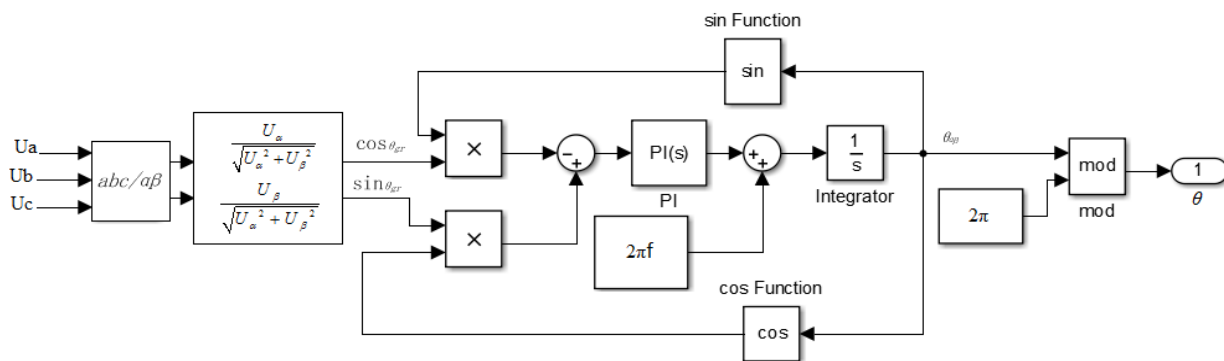


图 3 $\alpha\beta$ -PLL 控制框图

Fig. 3 block diagram of $\alpha\beta$ -PLL

$\alpha\beta$ -PLL 的电压转换类似 dq-PLL，参考图 1，但参与控制计算的只有 U_α 和 U_β [15], [16]，即 abc 三相电压只转换到 $\alpha\beta$ 两相静止坐标系。在式 (1) 中，只要令 $\theta=0$ ，即可得到 U_α 和 U_β 。在实际计算中，当 $\Delta\theta$ 很小时，其值可通过式 (2)、式 (3) 估算：

$$\Delta\theta = \theta_{gr} - \theta_{\alpha\beta} \approx \sin(\theta_{gr} - \theta_{\alpha\beta}) \quad (2)$$

$$\Delta\theta \approx \sin(\theta_{gr})\cos(\theta_{\alpha\beta}) - \sin(\theta_{\alpha\beta})\cos(\theta_{gr}) \quad (3)$$

1.2.2 $\alpha\beta$ -PLL 控制策略

$\alpha\beta$ -PLL 控制框图如图 3 所示。

在 $\alpha\beta$ -PLL 控制过程中，仍然以锁相环的输出 θ 为反馈量，但控制误差是 $\alpha\beta$ 坐标系下 U_α 和 U_β 同 θ 三角函数的乘积（参见表达式 (3)）。这一乘积反映了估计相位的误差，经过 PI 调节器，再将其和理论角频率相加，通过积分环节后就可以得到电压相位角的估计值， $\theta_{\alpha\beta}$ 。在该双反馈参数的控制系统中，锁相环输出值的超调量可以大幅下降，系统稳定性也得到加强。

综合分析 dq-PLL 和 $\alpha\beta$ -PLL 方法，两者都具有原理简单，响应速度较快，相位和频率跟踪精确等优点。其中， $\alpha\beta$ -PLL 还具有较好的系统稳定性。但这些特点都是在三相平衡系统下才成立，当三相电压不平衡时，且存在谐波污染等非理想环境下，dq-PLL 和 $\alpha\beta$ -PLL 就无法准确地跟踪电网电压的频率和相位。为了应对电压不平衡故障，也有人提出

分离正负序电压的锁相方法，如 ddsrf-PLL，但类似于 dq-PLL，ddsrf-PLL 频率过调问题很突出，降低了系统稳定性 [17]。基于当前研究情况，本文提出了一种新的锁相方法，称作 $d\alpha\beta$ -PLL 算法。

2 新型 PLL 设计

2.1 $d\alpha\beta$ -PLL 控制原理分析

在三相电压不平衡故障中，同时存在负序和零序电压分量，为了实现对正序分量精确锁相，必须去除三相电压中负序和零序分量的影响。 $d\alpha\beta$ -PLL 首先对正负零序电压进行分离，经过解耦计算，然后对正序分量进行锁相。图 4 为分析 $d\alpha\beta$ -PLL 算法的电压转换矢量图。

从图 4 可知，正负序两个分量需要通过不同坐标变换来分离，即分别以逆时针 ω 和顺时针 $-\omega$ ，绕 $dq+$ 和 $qd-$ 坐标作同步旋转。零序分量经坐标变换后一般为 0，即使不为零对正序分量的控制也无影响，所以这里只需考虑消除负序分量就可以。当三相电压不平衡故障时，电压表达式可写成式 (4)。

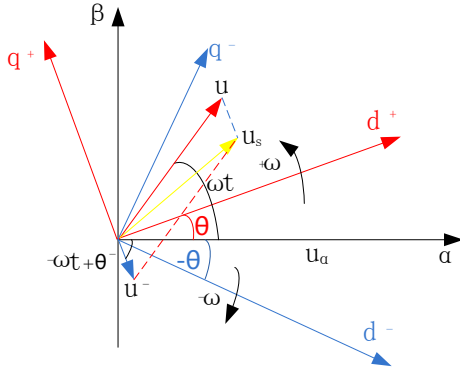


图 4 dqβ-PLL 电压转换矢量图

Fig. 4 voltage vector diagram for dqβ-PLL frame transformation

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U \cos(\omega t) + U^- \cos(-\omega t + \theta^-) \\ U \cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi) + U^- \cos(-\omega t - \frac{2}{3}\pi + \theta^-) \\ U \cos(\omega t + \frac{2}{3}\pi) + U^- \cos(-\omega t + \frac{2}{3}\pi + \theta^-) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中：假定正序分量初相角为 0，幅值为 U ；负序分量初相角为 θ^- ，幅值为 U^- 。利用 Clack 和 Park 变换，把三相电压矢量分别分解在按正反向旋转的坐标系 dq^+ 和 qd^- 上。由式 (4) 可得到两组不同的表达式，即式 (5) 和 (6)，其中 $[U_{d^+}, U_{q^+}]$ 为正方向旋转坐标的分量， $[U_{d^-}, U_{q^-}]$ 为负方向旋转坐标的分量。

$$\begin{bmatrix} U_{d^+} \\ U_{q^+} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t - \theta) & \cos(-2\omega t + \theta^-) \\ \sin(\omega t - \theta) & \sin(-2\omega t + \theta^-) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \\ U^- \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} U_{d^-} \\ U_{q^-} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \theta) & \cos(\theta^-) \\ \sin(\omega t + \theta) & \sin(\theta^-) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \\ U^- \end{bmatrix} \quad (6)$$

上式中 θ 为 d 轴和 α 轴之间的夹角。当锁相完成时， $\omega t \approx \theta$ ，此时式 (5) 和式 (6) 可写成：

$$\begin{bmatrix} U_{d^+} \\ U_{q^+} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \cos(2\omega t) & \sin(2\omega t) \\ 0 & -\sin(2\omega t) & \cos(2\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \\ U^- \cos(\theta^-) \\ U^- \sin(\theta^-) \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} U_{d^-} \\ U_{q^-} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(2\omega t) & 1 & 0 \\ \sin(2\omega t) & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \\ U^- \cos(\theta^-) \\ U^- \sin(\theta^-) \end{bmatrix} \quad (8)$$

从式 (7) 和 (8) 可知，正反向旋转坐标上的分量中除了包含呈直流状态的正负序分量外，还包含相互耦合的 2 次谐波分量。为了提取其中的正负序分量幅值，我们可以通过以下公式 (9) 和 (10)，即采用 dq 解耦方式，以 dq^+ 和 dq^- 的估计值互为反馈来消除交流分量。在实际情况下，估计值还会存在 2 次谐波，可用低通滤波器进一步平滑。

$$\begin{bmatrix} (U_{d^+})^* \\ (U_{q^+})^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{d^+} \\ U_{q^+} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\cos(2\omega t) & -\sin(2\omega t) \\ \sin(2\omega t) & -\cos(2\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (U_{d^-})^* \\ (U_{q^-})^* \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} (U_{d^-})^* \\ (U_{q^-})^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{d^-} \\ U_{q^-} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\cos(2\omega t) & -\sin(2\omega t) \\ -\sin(2\omega t) & \cos(2\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (U_{d^+})^* \\ (U_{q^+})^* \end{bmatrix} \quad (10)$$

经 dq^+ 和 dq^- 解耦后得到的正序分量 U_{d^+} 和 U_{q^+} 幅值，作为 $\alpha\beta$ -PLL 锁相器的输入量，把锁相器的输出量 $\theta_{d\alpha\beta}$ 作为估计值同时反馈给 dq^+ 和 dq^- 旋转变换的计算模块。表达式 (9) 和 (10) 中的解耦、估计以及 PLL 锁相计算，称为 dqβ-PLL。

分析 dqβ-PLL 的算法，不难发现该锁相设计可实现在三相电压不平衡故障时的精确锁相，但该方法也存在一问题，如响应速度慢，并不能满足 DVR 小于 1/4 工频周波 (5 ms) 响应要求。所以，本文又提出了在 dqβ-PLL 基础上，叠加“推演顺接”的锁相策略，来进一步改善响应时间。

2.2 “推演顺接”锁相

“推演顺接”锁相方法是在电压跌落开始的第一个周波 T (20 ms) 内，根据电压采样的历史数据推演出该周波的电压，用 $\alpha\beta$ -PLL 电压锁相法来估计出电压跌落时的相位。由于按历史数据推演出的电压仍然保持三相对称，所以能满足快速锁相的目的。

在一个周波之后,控制策略采用前面的 $d\alpha\beta$ -PLL锁相环进行相位估计。这样既满足了DVR的快速响应要求,又达到了准确补偿的目的,同时抑制了不对称跌落的影响。

为了便于分析,假设电压采样频率为5 kHz,采样时间间隔为 Δt 。在装置运行时,记录一个周波的采样数据为 $U_a[n]$ 、 $U_b[n]$ 和 $U_c[n]$ 。其中 U_a 、 U_b 、 U_c 分别为a、b、c三相电压, $n=(1, 2, \dots, N)$,采用先入先出的数据排序方法,最新的采样总是保存在 $U[N]$ 。假定某一时刻发生电压跌落故障,则采用前一周期的数据,即 $U_a[n]$ 、 $U_b[n]$ 和 $U_c[n]$ 进行锁相。由于上述推演的数据是在正常三相平衡时获得,采用 $\alpha\beta$ -PLL就可以进行快速锁相。20 ms之后, $d\alpha\beta$ -PLL的计算值已达到可正常跟踪的精度,此时电压相位的估计值可使用 $d\alpha\beta$ -PLL锁相器的输出。在实际应用中,为避免两种算法在切换时出现频率和相角跳变,在切换过程中需要对频率和相角进行插值过渡,以确保平稳衔接。

3 仿真分析

3.1 仿真模型

在理论分析的基础上,本文进行了Matlab仿真

分析,仿真系统的模型如图5所示。其中假设系统电压为10 kV,频率50 Hz,线路额定容量10 MVA。当 $t=2.52$ s时系统模拟发生时长为0.4 s的电压跌落故障,分析在不同跌落程度和故障模式下,采用 $\alpha\beta$ -PLL以及 $d\alpha\beta$ -PLL和“推演顺接”锁相改进方法等几种锁相策略的性能。

3.2 $\alpha\beta$ -PLL仿真结果

模拟的故障条件是,当 $t=2.52$ s时三相电压中的abc各相分别跌落30%、40%、50%,其中还包含幅值为1000 V的三次谐波,并伴随 10° 相移畸变。采用 $\alpha\beta$ -PLL锁相方法的仿真结果如图6、图7、图8所示,分别为故障电压波形、锁相输出频率和锁相角。从图可见,当不平衡跌落故障发生时, $\alpha\beta$ -PLL锁相方法估计出的频率及相位角度和实际存在一定误差。

为了便于比较,我们对三相电压平衡跌落的故障情况也作了分析。同样设定当 $t=2.52$ s时,三相电压同时跌落40%,故障电压波形、锁相环输出频率和相角的仿真结果如图9、图10、图11所示。由图可见,在电压平衡跌落故障中,采用 $\alpha\beta$ -PLL锁相方法,估计的频率和相位角则比较准确。

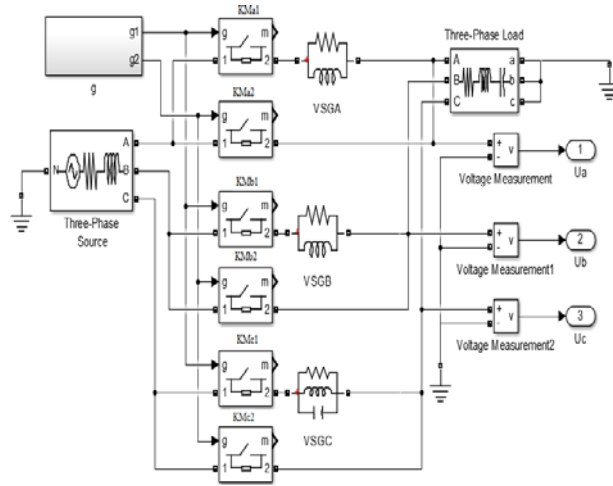


图 5 系统故障的仿真模型

Fig. 5 Mat lab model for system fault simulation

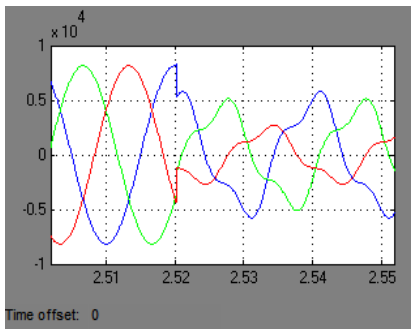


图 6 不平衡跌落时的故障电压

Fig. 6 voltage waveform during imbalance sag

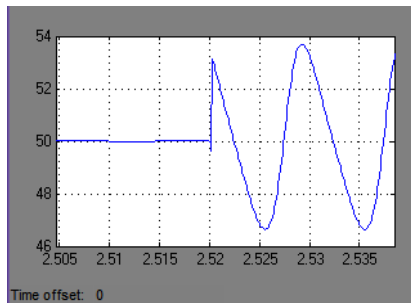


图 7 不平衡跌落故障时的 $\alpha\beta$ -PLL 频率

Fig. 7 estimated frequency of $\alpha\beta$ -PLL during imbalance sag

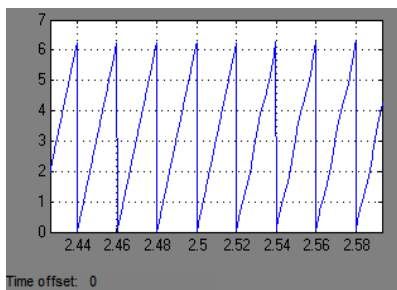


图 8 不平衡跌落故障时的 $\alpha\beta$ -PLL 锁相角

Fig. 8 estimated angle of $\alpha\beta$ -PLL during imbalance sag

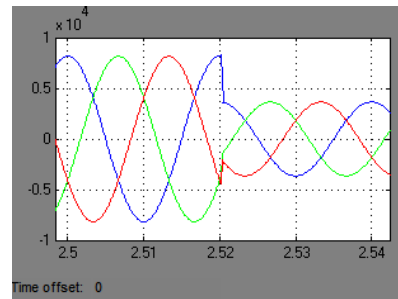


图 9 电压平衡跌落故障时的电压

Fig. 9 voltage waveform during balance sag

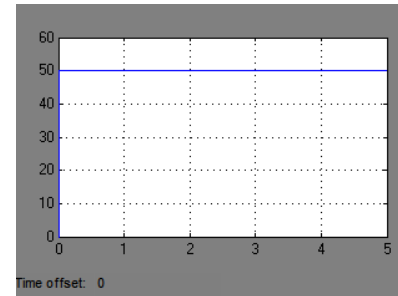


图 10 平衡跌落故障时 $\alpha\beta$ -PLL 频率

Fig. 10 estimated frequency of $\alpha\beta$ -PLL during balance sag

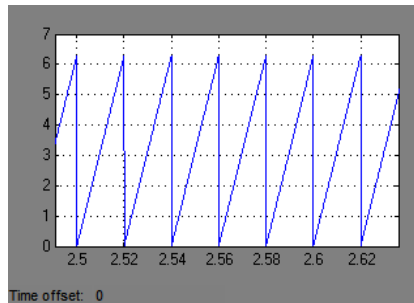


图 11 平衡跌落故障时 $\alpha\beta$ -PLL 锁相角

Fig. 11 estimated angle of $\alpha\beta$ -PLL during balance sag

3.2.1 $d\alpha\beta$ -PLL 仿真结果

在上述相同故障条件下, 本文对采用 $d\alpha\beta$ -PLL 锁相策略也进行了仿真分析。图 12 和图 13 分别为锁相环输出频率和相位角, 故障电压波形和前面图 6 一样。

$d\alpha\beta$ -PLL 锁相方法在电压平衡跌落时的结果与不平衡跌落时的结果非常接近, 所以不再重复图示。

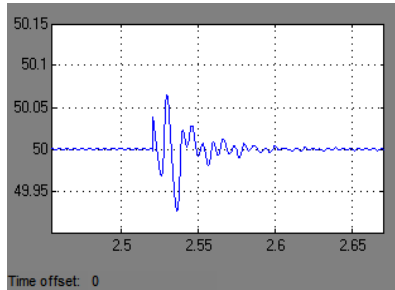


图 12 $d\alpha\beta$ -PLL 不平衡故障时的频率

Fig. 12 estimated frequency of $d\alpha\beta$ -PLL during imbalance sag

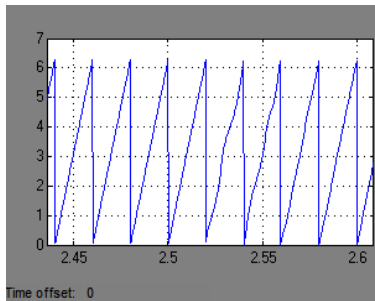


图 13 $d\alpha\beta$ -PLL 不平衡故障时的相位角

Fig. 13 estimated angle of $d\alpha\beta$ -PLL during imbalance sag

3.2.2 “推演顺接”锁相结果

采用 $d\alpha\beta$ -PLL 和“推演顺接”相结合的锁相策略, 图 14 和图 15 分别为估计出的频率和相位角。由于上述图形是通过仿真结果中的故障区域进行手动放大而成, 各个图中的时间和幅值刻度很难保证一样, 所以在对比结果时请注意不同图中 XY 轴刻度的变化。从图中可见, 采用“推演顺接”锁相方法, 在故障发生后的 20 ms 内也能很好地跟踪电网相位。

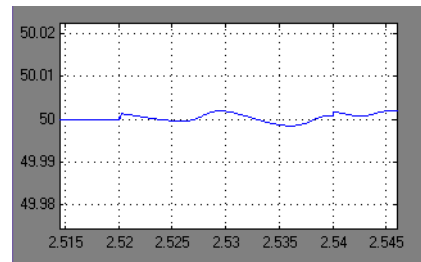


图 14 “推演顺接”锁相在不平衡故障时的频率

Fig.14 estimated angle of “coastdown n pickup” during imbalance sag

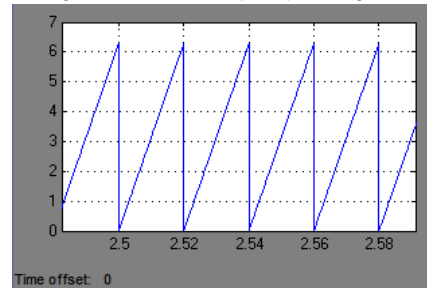


图 15 “推演顺接”锁相在不平衡故障时的锁相角

Fig.15 estimated angle of “coastdown n pickup” during imbalance sag

3.3 仿真结果分析

分析仿真结果, 不难发现, 在电压平衡跌落故障时, $\alpha\beta$ -PLL 锁相的效果比较理想, 但当实际故障条件复杂, 电压跌落不平衡且有谐波和相移时, 该锁相算法的输出频率偏差超过 ± 2 Hz, 锁相角也变成不规则的锯齿波形, 难以实现准确锁相。

$d\alpha\beta$ -PLL 锁相环在三相电压不平衡故障时的输出结果 (图 12、图 13), 与 $\alpha\beta$ -PLL 相比, 锁相效果得到很大提高, 可以满足正常锁相。但在故障初始时刻, 估计出的频率大约有一个周波时间的振荡, 振幅超过 $\pm 5\%$ 。这将导致在故障 5 ms 内无法准确锁定相位。

为了解决 $d\alpha\beta$ -PLL 在故障起始时刻输出频率有振荡的问题, 本文采取了“推演顺接”锁相方法。根据图 14、图 15 的仿真结果不难看出, “推演顺接”锁相在故障发生的第一个周波内就能锁相成功, 也没发生大的振荡。第一个周波之后, 输出频率和相位角的波形也比较平滑, 没有出现尖刺或突变。可见“推演顺接”方法可以实现电压不平衡跌落故障时的锁相问题, 并具有快速响应能力。在实际研发的样机中也采用了该方案, 取得了比较满意的效果。

4 结论

本文对几种软件锁相算法进行了理论和仿真分析,其中在工程应用中较为成熟的有 dq-PLL 和 $\alpha\beta$ -PLL。通过对常用锁相算法的分析,以及针对 DVR 在任何故障时能够在 5 ms 内输出补偿电压的要求,发现上述方法在处理复杂故障工况和兼顾响应速度方面均不能达到满意效果。

本文提出了一种新型锁相算法和控制策略,即 $d\alpha\beta$ -PLL 和“推演顺接”锁相方法。其中, $d\alpha\beta$ -PLL 方法是对电压中的正负序分量进行解耦,在电压不平衡跌落、有谐波和相移的复杂工况时,能够实现准确锁相,但响应速度还不够快。而“推演顺接”锁相方法是在 $d\alpha\beta$ -PLL 的基础上改进,在故障开始的第一个周波内使用历史数据来推演出相位角,确保控制器在 5 ms 内能够锁相成功。在一个周波之后,用 $d\alpha\beta$ -PLL 方法锁相。在两种方法的切换过程中,可对两种估计值进行插值过渡,实现平稳切换。

在理论分析的基础上,本文用 Matlab 搭建了 10 kV/10 MVA 的电网系统,模拟不同电压跌落故障,比较了各种锁相算法的仿真结果。仿真表明,本文提出的 $d\alpha\beta$ -PLL 和“推演顺接”锁相策略,能够在 5 ms 内实现电压不平衡跌落故障工况时的锁相功能,满足 DVR 对锁相环节快速、准确和稳定的要求。

参考文献

- [1] 张华赢,张少杰,余鹏,等. 中压大功率电压暂降综合治理装置工业可行性方案研究[J]. 智能电网, 2014, 7(2): 9-14.
ZHANG Huaying, ZHANG Shaojie, YU Peng, et al. Industrial feasibility of medium-voltage high-power comprehensive treatment device for voltage sags [J]. Smart Grid, 2014, 7(2): 9-14.
- [2] OMAR R, RAHIM N A, SULAIMAN M. Dynamic voltage restorer application for power quality improvement in electrical distribution system: an overview [J]. Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 2011, 5(12): 379-396.
- [3] 动态电压恢复器技术规范: DL/T 1229-2013 [S].
- [4] 肖湘宁,徐永海,刘昊. 电压凹陷特征量检测算法研究[J]. 电力自动化设备, 2002, 22(1): 19-22.
XIAO Xiangning, XU Yonghai, LIU Hao. Research on the detection method of voltage sag characteristics [J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22(1): 19-22.
- [5] 周晖,齐智平. 动态电压恢复器检测方法和补偿策略综述[J]. 电网技术, 2006, 30(6): 23-29.
ZHOU Hui, QI Zhiping. A survey on detection algorithm and restoring strategy of dynamic voltage restorer [J]. Power System Technology, 2006, 30(6): 23-29.
- [6] 杨新华,郭志成. 动态电压恢复器软件锁相技术[J]. 电力自动化设备, 2011, 11(31): 56-59.
YANG xinhua, GUO zhicheng. Soft PLL technique of dynamic voltage restore [J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 11(31): 56-59
- [7] 郭栋. 动态电压恢复器的锁相与控制策略研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2008.
GUO dong, Research on Phase Locked method and Control Strategy for Dynamic Voltage Restorer[D], Hefei University of Technology, 2008
- [8] 徐亚伟. 并网逆变器中全软件锁相环的设计与实现[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
XU yawei, Design and Implementation of Software Phase Locked Loop for Grid-tied Inverter [D], Nanjing University of Science and Technology, 2014
- [9] 裴喜平,郝晓弘,陈伟,等. 电网电压不对称故障下软件锁相技术[J]. 电力自动化设备, 2012, 9(32): 80-84.
FEI xiping, HAO xiaohong, CHEN wei, et.,al., SPLL technique in grid voltage asymmetry fault[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 9(32): 80-84
- [10] 陈琦,熊良根,刘述军. 基于双 dq 变换软件锁相的动态电压恢复器研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 4(43): 87-93.
CHEN Qi, XIONG Lianggen, LIU Shujun. Research of dynamic voltage restorer based on double dq synchronous software phase-locked loop [J]. Power System Protection and Control, 2015, 4(43): 87-93.
- [11] 吉正华,韦芬卿,杨海英. 基于 dq 变换的三相软件锁相环设计[J]. 电力自动化设备, 2011, 4(31): 104-106.
JI Zhenghua, WEI Fenqing, YANG Haiying. Three-phase software phase-locked loop based on dq reference frame[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 4(31): 104-106
- [12] 陈国栋,朱淼,蔡旭,等. 一种软件锁相环和电压跌落检测新算法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 25(34): 4385-4393.
CHEN Guodong, ZHU Miao, CAI Xu, et al. A new algorithm for software phase locked-loop and voltage sag detection [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 25(34): 4385-4393.
- [13] 姜齐荣,王亮,张春朋,等. 基于频率和初相角解耦检测的新型锁相环[J]. 电力系统自动化, 2013, 18(37): 113-119.
JIANG Qirong, WANG Liang, ZHANG Chunpeng, et. al. A New Phase-locked Loop Based on Decoupled Detection of Frequency and Initial Phase Angle, Electric Power Automation Equipment, 2013, 18(37): 113-119.
- [14] LIU Huawu, SUN Yongheng, HU Haibing, et al. A new single-phase PLL based on discrete fourier transform [J]. Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2015, 15(19): 521-526.
- [15] GOLESTAN S, MONFARED M, DFREIJEDO F, et al. Advantages and challenges of a type-3 PLL [J]. Power Electronics, 2013, 11(28): 4985-4997.
- [16] HADJIDEMETRIOU L, KYRIAKIDES E, BLAABJERG F. A new hybrid pll for interconnecting renewable energy systems to the grid

[J]. Industry Applications , 2013, 6(49): 2709-2719.

收稿日期: 2016-04-15

作者简介:

胡军 (1966), 男, 博士, 研究员, 从事与电力电子、电机控制、再生能源以及智能电网的技术研究, johnhu09@yeah.net;

曹军威(1973), 男, 博士, 研究员, 从事分布式计算技术及其在能源电力行业的应用研究。

张少杰(1982), 女, 硕士, 工程师, 从事电能质量和能源电力行业技术研究。zhangshaojiegrid@sina.com;