

基于IGBT的微电网解并列控制系统研究

设计了一种基于IGBT的微电网快速解并列装置,采用了具有快速开通/关断性能的IGBT作为主开关,代替开关速度较慢的断路器、接触器等机械式开关,来实现微电网与大电网之间的解并列。并设计了基于双核DSP和FPGA的微电网解并列控制系统,实现了模拟量采集、参数计算、控制逻辑、IGBT开关控制以及通信功能。通过双同步坐标系解耦的软件锁相环(DDSRF-SPLL)算法实时检测电压幅值、频率以及相位,实现了电压检同期逻辑判断。采用基于 I_p-I_q 变换的谐波检测方法FFT相结合,对并网电流谐波实时检测,利用TI 28377D双核DSP的并行计算优势,提高检测准确度,并将检测结果作为解并列判断依据和电能质量参数实时传输到微电网控制器。

郭巍 杨婷 王磊/中国能源建设集团装备有限公司南京技术中心

0 引言

微电网技术是新型电力电子技术、可再生能源技术、现代控制理论和储能技术等的综合,微电网将发电机、负荷、储能和控制装置结合在一起,最终形成一个可控的单元微网系统^[1]。在并网运行模式下,当大电网出现停电事故时,需要迅速从大电网解列,切换到孤岛运行模式,保证微电网负荷的可靠供电;在孤岛运行模式下,当大电网恢复正常以后,应迅速切换到并网运行模式^[2]。为保证微电网内的重要负荷不间断供电,这就要求微电网由并网运行转为孤岛运行时的速度够快,能实现无缝切换。目前,微电网不同运行模式间的切换多依靠机械式开关,开关速度较慢,不能满足微电网与大电网之间的无缝切换,降

低了对重要负荷供电的可靠性。为此,设计了一种以IGBT为主开关的解并列装置,以双核DSP和FPGA为核心的微电网解并列控制系统。

1 系统整体设计方案

微电网智能快速解并列装置包括主回路和控制回路。主回路结构如图1所示,其主回路由具有快速开通/关断性能的IGBT、电流断路器(CB)和熔断器(FS)组成。采用的是两个反向串联的具有快速开通/关断性能的IGBT,串联的IGBT两侧各串联一个电流断路器(CB₂和CB₃),另设有旁路开关(CB₁)用于检修更换IGBT时能保证装置的正常工作。另外,主回路中还设有熔断器(FS)用于过电流保护。

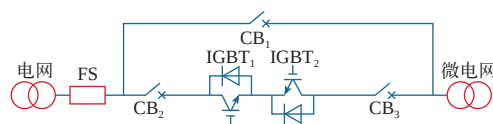


图1 主电路结构

控制回路包括DSP和FPGA控制单元,微电网、电网电压检测、IGBT温度检测和并网电流检测电路,RS 485、以太网通信电路,LCD显示、开入开出电路与IGBT驱动电路等。主要实现电压检同期、电流谐波检测、IGBT驱动保护、过电流保护和通信功能。

2 微电网平滑并网检测

微电网带电并网时,必须限制其对系统的冲击。此时的微电网可视为等效发电机,并网技术参数要求和并网过程



郭巍/工程师

关键词/Keywords

微电网·
解并列·
IGBT·
谐波检测·

国家863计划项目(2011AA05A107):微电网解并列控制技术及电能质量复合控制技术研究。

均可参考发电机并网相应的规定。IEEE 1547—2003中给出了同步互联时的参数允许范围,如下表所示。同时规定^[3]设备闭合瞬间,下表中的参数均处于给定的范围内。若任何一个参数超出了下表中所述的范围,并联设备将不能闭合。本项目中微电网侧容量为400 kV·A。

表 分布式电源并网参数限值

DR 单元合计容量/kV·A	频差Δf/Hz	压差ΔV(%)	相角差Δθ(°)
0~500	0.3	10	20
500~1 500	0.2	5	15
1 500~10 000	0.1	3	10

2.1 电压检同期参数设计

用 V_m 表示微电网电压矢量,用 V_g 表示主电网电压矢量,则两个电压矢量的瞬时电压偏差为^[3]

$$|V_m - V_g| = |v_m e^{j(\omega_m t + \theta_{m0})} - v_g e^{j(\omega_g t + \theta_{g0})}| \quad (1)$$

式中, v_m 、 ω_m 和 θ_{m0} 与 v_g 、 ω_g 和 θ_{g0} 分别为微电网和电网电压的幅值、角频率和初始相角。设两者的幅值和相位相同,分别为 v_n 、 ω_n ,则式(1)可以表示为

$$|V_m - V_g| = 2v_n \left| \sin \left(\frac{\theta_{m0} - \theta_{g0}}{2} \right) \right| \quad (2)$$

由上表可以得,并网前相角偏差应小于 20° 。由式(2)可得,最大电压偏差为 $34.7\%v_n$ 。为保证微电网安全以及实现两种运行模式间的平滑过渡,从微电网角度出发,并网有时需满足更严苛的标准。由式(2)可知,若期望瞬时电压偏差 $5\%v_n$ 以内,则相位偏差需在 2.86° 以内。另外,为确保稳定操作和防止干扰,这3个差值需维持在该限制内一段时间(如10个基波期)。因此,采用式(3)~式(5)所示准同期检定条件。

$$|V_m - V_g| \leq 0.1v_n \quad (3)$$

$$|f_m - f_g| \leq 0.02 \text{ Hz} \quad (4)$$

$$|\theta_{m0} - \theta_{g0}| \leq 2.86^\circ \quad (5)$$

式中, f_m 、 f_g 分别为微电网和电网频率。

当3个条件同时满足,且持续时间超过200 ms,作为检同期合格条件。

2.2 基于锁相环的参数计算

对电网的实时相角进行测量,测量相角的方法很多,其中最简便的是过零检测法,但这种方

法存在着许多问题,如抗干扰能力差等。PLL是目前三相系统使用最普遍的相位同步方法,是一种基于反馈控制原理实现频率及相位的同步技术,一般由鉴相器、环路滤波器和压控振荡器等组成一个反馈回路^[4]。针对三相电网电压不平衡时的锁相问题,采用带双同步坐标系解耦的软件锁相环(DDSRF-SPLL)方案^[5]。采用了基于正负序解耦算法,有效克服了频率变化对锁相环性能的影响。其解耦网络如图2所示,解耦单元如图3所示。

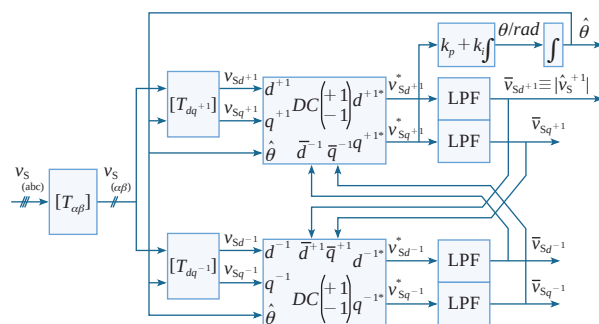


图2 dq^0 坐标系的解耦网络

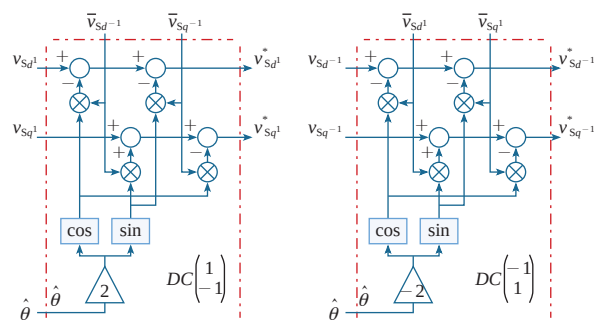


图3 dq^0 坐标系的解耦单元

由于正负序的解耦计算会造成解耦系统的振荡,尤其是在电网波动及电压失真的情况下,通过在解耦输出加入一阶低通滤波器解决系统振荡,可以抑制低次谐波干扰,更加准确地分离出正负序分量。低通滤波器转折频率 ω_b 对解耦输出的影响结论为:当 $\omega_b/\omega_0 = 1/1.414$ 时,正序分离处于临界阻尼,此时达到稳态时间最短^[8]。由 $\omega_0 = 50 \text{ Hz}$,确定LPF的截止频率为35 Hz。图4对锁相环算法进行了仿真,在0.1 ms处加入了相位突变,锁相环在10 ms内重新锁定了相位,并保持了 U_d 和 U_q 的稳定输出。

不平衡需检测无功与负序的场合，系统可采用基于瞬时无功功率的检测方法。其他应用场合可采用FFT，以此来提高检测准确度并兼顾不同应用场合的实时性要求。

基于 $I_p - I_q$ 变换的谐波检测方法，计算基波以及各次谐波幅值，并将计算结果发送给微电网控制器作为解并列的判断依据。该方法的谐波检测原理如图6所示。

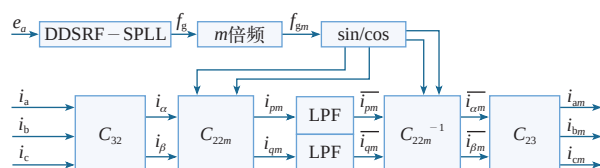


图6 基于 $I_p - I_q$ 变换的谐波检测流程

对于任意次谐波检测，使用前文中的DDSRF-SPLL对电网a相电压进行锁相，得到a相电压的基波频率 f_g ，将 f_g 根据谐波次数 m 进行 m 倍频得到 f_{gm} ，通过正弦、余弦计算器可以得到对应的余弦信号 $\cos m\omega t$ 与 $\sin m\omega t$ ，从而得到变换矩阵，即

$$C_{22m} = \begin{pmatrix} \sin m\omega t & -\cos m\omega t \\ -\cos m\omega t & -\sin m\omega t \end{pmatrix} \quad (10)$$

将两相电流 i_α 、 i_β 经过变换矩阵 C_{22m} 得出该坐标系下的各次谐波的有功和无功电流分量，即

$$\begin{pmatrix} i_{pm} \\ i_{qm} \end{pmatrix} = C_{22m} \begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix} = C_{22m} C_{32} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} \quad (11)$$

其中

$$C_{32} = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix}$$

将电流分量 i_{pm} 、 i_{qm} 经过LPF滤波得出 m 次谐波的有功和无功分量 $\bar{i}_{pm}$ 和 $\bar{i}_{qm}$ ，经过变换矩阵 C_{22m}^{-1} 求出两相坐标系电流 $i_{\alpha m}$ 与 $i_{\beta m}$ ，其中， C_{22m}^{-1} 为 C_{22m} 逆矩阵，与 C_{22m} 相同，则可求出

$$C_{32} \begin{pmatrix} i_{am} \\ i_{bm} \\ i_{cm} \end{pmatrix} = C_{23} \begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix} = C_{23} C_{22m}^{-1} \begin{pmatrix} i_{pm} \\ i_{qm} \end{pmatrix} \quad (12)$$

通过式(12)可得到 m 次谐波电流的三相分

量。当 $m=1$ 时，输出的为基波电流 i_{a1} 、 i_{b1} 和 i_{c1} ，将三相电流 i_a 、 i_b 和 i_c 与基波电流相减，可以得到总的谐波电流 i_{ah} 、 i_{bh} 和 i_{ch}

$$\begin{pmatrix} i_{ah} \\ i_{bh} \\ i_{ch} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} i_{a1} \\ i_{b1} \\ i_{c1} \end{pmatrix} \quad (13)$$

通过计算得出基波电流幅值 i_f ，即

$$i_f = \sqrt{i_{p1}^2 + i_{q1}^2} \quad (14)$$

则 m 次谐波电流幅值 i_{hm} 为

$$i_{hm} = \sqrt{i_{pm}^2 + i_{qm}^2} \quad (15)$$

与基于傅里叶变换的谐波检测算法相比，基于瞬时无功功率理论的方法具有更好的实时性，检测延时小于一个工频周期。延时和误差主要来源于低通滤波器，本设计中采用了二阶巴特沃兹低通滤波器，采样频率为10 kHz，截止频率为30 Hz。由于采样频率为10 kHz，设计最大计算到20次谐波含量。图7为通过 $I_p - I_q$ 谐波检测方法得到的3次、5次、7次和9次谐波含量仿真波形。

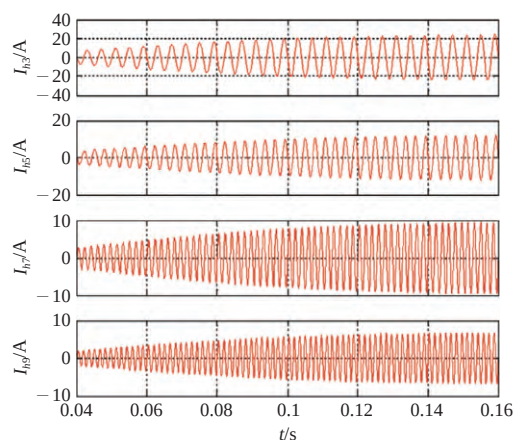


图7 3~9次谐波电流检测仿真

FFT通过一个不断移动的数据窗口，对要进行的傅里叶变换的数据进行替换。因此至少需要经过一个周期的测量，FFT才能跟踪上被测信号的变换。但经过改进后的FFT计算量相对较少，将DSP的CPU₁计算单元用来计算FFT；将计算量相对较大的基于 $I_p - I_q$ 单次谐波、无功与负序等检测放入CPU₂以及CPU₂的CLA中进行单独计算。

4 控制系统硬件设计

为了提高运算速度，控制系统采用TI28377D

双核DSP与FPGA协同控制^[7]。硬件平台主要包括传感器信号调理电路、故障保护电路、通信电路和存储电路等。这部分电路是服务于控制芯片保

证控制芯片正常工作的必要部分，系统结构如图8所示。FPGA通过数据总线、地址总线和控制IO分别与AD7606和DSP芯片连接，实现数据交换。

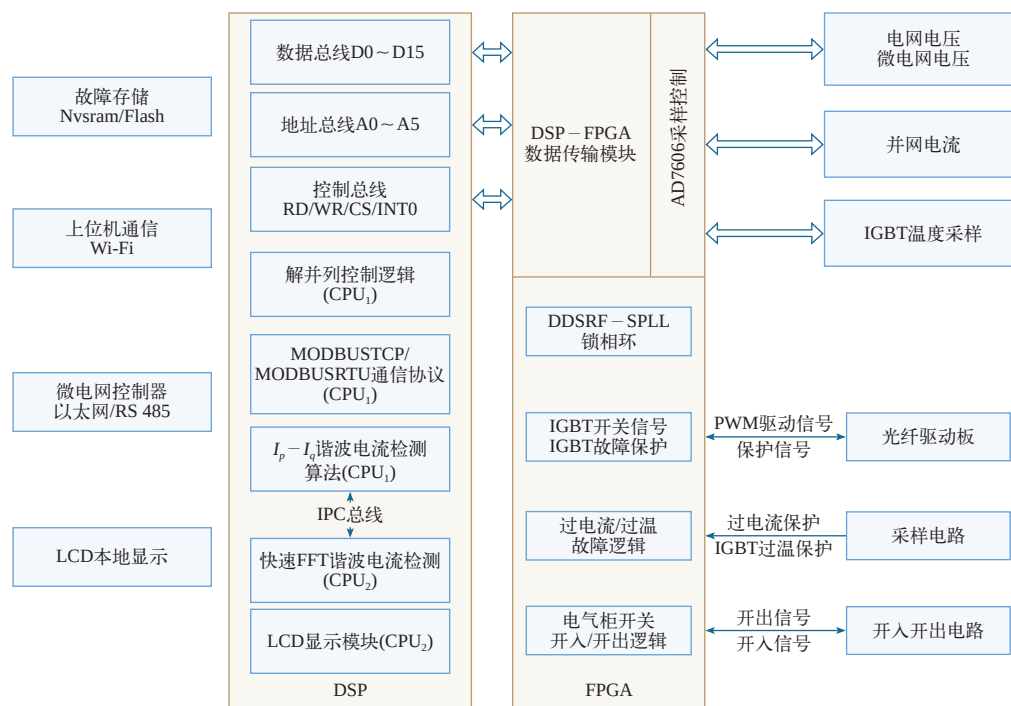


图8 DSP + FPGA控制系统结构

FPGA的设计属于数字电路硬件设计，运行速度相对较快，故一般将功能比较固定且对系统实时性和速度要求比较高的功能加入到FPGA^[4]，主要包括AD芯片控制、DDSRF-SPLL锁相环计算、IGBT开关信号、快速保护逻辑控制和开入开出逻辑控制。在DSP中是基于CPU的软件设计，设计周期短，便于修改，所以通常将需要经常修改的软件算法放到DSP中实现，主要功能包括数据的存储与调用、解并列控制逻辑、 I_p-I_q 谐波电流检测算法、FFT计算、数据通信与LCD显示。TI28377D DSP含有两个计算核心，其中CPU₁作为主CPU，主要进行基于 I_p-I_q 变换的谐波检测计算和对解并列控逻辑进行判断，FPGA数据传输，数据通信；CPU₂主要进行基于FFT的谐波检测计算与LCD数据显示功能，其中，CPU₁与CPU₂的数据交互采用内部IPC总线实现。

FPGA通过控制AD7606采样得到的微电网和电网侧电压采样传感器数据进入FPGA内部的数

据运算单元，根据预置的DDSRF-SPLL锁相环计算模块进行运算，分别得到微电网、电网电压幅值 v_m 、 v_g ，微电网、电网电压频率 f_m 、 f_g ，微电网、电网电压相位 θ_m 、 θ_g ，并将计算结果通过DMA方式发送给DSP的CPU₁。CPU₁将FFT计算结果与CPU₂中 I_p-I_q 变换的谐波检测算法计算结果结合，在电网畸变比较严重情况下，以瞬时无功功率计算的结果作为解并列控逻辑主要判据；在电网电压波形正常情况下，将FFT计算结果作为解并列控逻辑判据。CPU₁将判断结果发送给FPGA控制IGBT通断，通过以太网传输给微电网控制器；DSP将FPGA处理后的并网电流采样数据与锁相输出的电网电压频率 f_m 数据输入 I_p-I_q 谐波检测模块和FFT模块计算模块，并将计算得到的基波电流瞬时值、总谐波电流瞬时值、基波幅值和2~20次谐波幅值通过以太网发送给微电网控制器，作为远程控制模式时解并列的判断条件。

5 结束语

针对目前微电网不同运行模式间的切换多依靠机械式开关、开关速度较慢的现状,提出了以IGBT代替机械开关的微电网智能快速解并列装置,实现了当微电网由并网运行转为孤网运行时,能快速断开IGBT,实现无缝切换;当微电网需要由孤网运行转为并网运行时,通过能检测微电网和大电网两侧电压检同期计算,能快速闭合,以实现微电网与大电网之间的并列。通过对谐波电流的实时监测,并将计算结果实时发送给微电网控制器,以提供远程解并列判断依据。

参考文献

- [1] 梁有伟, 胡志坚, 陈允平. 分布式发电及其在电力系统中的应用研究综述 [J]. 电网技术, 2003, 27 (12): 71-75.
- [2] 周德佳, 赵争鸣, 袁立强. 300 kW 光伏并网系统优化控制与稳定性分析 [J]. 电工技术学报,

2008, 23 (11): 116-122.

- [3] 唐芬, Josep M, 周啸, 等. 一种可实现微网系统快速平滑并网的主动同步控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38 (8): 15-21.
- [4] Best R E. Phase-locked loops: design, simulation and applications [M]. 6th ed. New York: McGraw-Hill Professional, 2007.
- [5] 袁越, 李振杰, 冯宇, 等. 中国发展微网的目的方向前景 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34 (1): 59-63.
- [6] 刘春花. 基于 $I_p - I_q$ 法的混合有源滤波器谐波电流检测方法 [J]. 继电器, 2005, 33 (5): 24-26.
- [7] 郭巍, 肖遥. 基于DSP与FPGA的变流器通用控制平台研究 [J]. 电气传动, 2014, 44 (2): 43-50.
- [8] 杜雄, 王国宁, 孙鹏菊, 等. 采用正弦幅值积分器的电网基波电压同步信号检测 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33 (36): 104-111.

(收稿日期: 2015-06-13) EA

广告|AD



Weidmüller

魏德米勒D系列继电器 —卓越品质和高性价比的完美结合

魏德米勒为全球客户和合作伙伴提供高品质继电器产品。

魏德米勒D系列继电器体积小, 灵敏度高; 多种规格可选, 拥有多种认证; 结构合理, 用途广泛; 可广泛应用于电力行业, 是一款高性价比继电器产品。

扫一扫, 关注魏德米勒官方微信



Let's connect.

魏德米勒电联接(上海)有限公司

电话: 86 21-22195008 网址: www.weidmueller.com.cn

中国知网 <http://www.cnki.net>