DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2013.02.024

基于正反馈主动移频式孤岛检测算法的模糊优化*

吴芳德,张奔奔,胥 芳*

(浙江工业大学 特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室, 浙江 杭州 310014)

摘要:孤岛检测是并网光伏发电系统必备的功能,基于正反馈的主动频率偏移法是目前应用最为广泛的一种孤岛检测算法。针对 该算法在反馈参数选择时孤岛检测盲区和输出电能质量难以兼顾的问题,分析了算法参数与孤岛检测盲区和输出电能质量的关系, 给出了算法参数的选取范围,采用模糊控制,根据电网断开后公共点电压频率的变化情况对反馈参数进行了自适应在线调整,建立 了基于Simulink/SimPowerSystems的孤岛检测仿真模型。仿真结果表明,该方法不仅能够实现并网光伏发电系统的无盲区检测,而且 其输出电流畸变率比常规算法降低了1.49%。

关键词:并网;光伏发电系统;孤岛检测;主动频率偏移;模糊优化 中图分类号:TM615 **文献标志码**:A

文章编号:1001-4551(2013)02-0223-05

Fuzzy optimization of islanding detection algorithm based on active frequency drift with positive feedback

WU Fang-de, ZHANG Ben-ben, XV Fang

(Key Laboratory of E&M, Ministry of Education & Zhejiang Province, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Anti-islanding protection is mandatory feature for grid-connected inverters. Active frequency drift (AFD) with positive feedback islanding detection method is the most widely used at present. It is difficult to give consideration to non-detection zone and output power quality when chose the algorithm parameter. In order to solve the problem, firstly, the relationship between the algorithm parameter and the above two aspects was analyzed, and then the rang of algorithm parameter was given. Finally, the feedback parameter was adaptively online adjusted based on fuzzy control according to the change of voltage frequency at point of common coupling when grid disconnect.Simulation model for islanding detection based on Simulink/SimPowerSystems was established. Simulation results demonstrate this method not only can have no non-detection zone, but also reduces the output current distortion by 1.49% than the conventional algorithm.

Key words: grid-connected; photovoltaic system; islanding detection; active frequency driftt(AFD); fuzzy optimization

0 引 言

太阳能光伏发电是太阳能直接利用的一种形式, 随着越来越多的光伏发电系统并入电网,必将对电网 及并网光伏发电系统的安全运行带来新的挑战。其 中,如何快速有效地进行孤岛检测是并网光伏发电技 术所面临的重要难题之一^[1-2]。 在并网光伏发电系统的孤岛检测中,孤岛检测方 法一般分为被动式和主动式两大类。被动式孤岛检 测方法通过检测逆变器输出端电量(如电压幅值、频 率、相位、谐波等)的变化来判断是否发生孤岛,存在 门槛值难以设定、检测盲区大等缺点,而且当逆变器 输出功率与负载所需功率匹配时单纯依靠被动检测 法容易漏检,因此研究者必须要引入主动检测法。带

收稿日期: 2012-08-22

基金项目:国际科技合作计划重点资助项目(2005DFA70380);浙江省重点学科建设基金资助项目(102090314) 作者简介:吴芳德(1987-),男,河南信阳人,主要从事光伏并网发电技术方面的研究. E-mail;wfd0620@126.com 通信联系人: 胥 芳,女,博士,教授,博士生导师. E-mail:fangx@zjut.edu.cn

正反馈的主动频率偏移法(Active Frequency Drift with Positive Feedback, AFDPF)^[3-5]是目前应用最为广 泛的一种主动式孤岛检测方法,然而其检测性能取决 于扰动量的大小,即:扰动量越大,孤岛检测盲区 (NDZ)越小,输出电流的总谐波失真度(THD)却越 大。针对这一问题,文献[6]采用间歇性扰动和加大 扰动周期的方法来提高输出电流波形的质量,但间歇 扰动不利于电网断开后频率偏差的累积,可能会延长 孤岛检测时间:文献[7-8]运用相位判据建立了负载 参数空间,并在此基础上给出了特定负载下实现无盲 区检测的算法参数范围,没有考虑算法参数对电流畸 变的影响。此外,上述算法都有一个共同点:为了避 免出现孤岛检测盲区,都以最恶劣工况下¹⁹的本地负 载为标准配置固定而且较大的反馈参数。由于电路 噪声、检测误差以及电网本身的波动,基于该参数下 的AFDPF法必然会导致在正常并网时大大降低输出 电能的质量。

鉴于此,本研究分析AFDPF算法参数与输出电流 THD和NDZ的关系,给出反馈参数的最大取值范围, 最后根据电网断开后PCC点电压频率的变化情况对 AFDPF法反馈参数进行模糊优化。

1 AFDPF法与输出电流THD的关系

AFDPF法是通过对并网逆变器输出电流的频率 施加扰动来实现孤岛检测的,其扰动量的大小可由截 断系数 cf 表示:

$$cf = k \cdot \Delta f + cf_0 = k(f - f_g) + cf_0 \tag{1}$$

式中: k 一正反馈系数, Δf 一公共耦合点(PCC)电压的频率 f 与电网额定频率 f_s 之差, cf_o 一初始截断系数。

AFDPF法下逆变器输出电流的波形如图1所示。



图1 AFDPF法逆变器输出电流波形示意图

 i_{inv} —AFDPF法下的并网逆变器的输出电流; u_{pec} —PCC点 电压; T_g —电网周期; t_z —电流到达零点而电压未到达零点时 强制为零的时间, $t_z = cf \times T_g/2$

由于逆变器输出电流中插入了一段死区时间,其 波形不再是标准的正弦波,并网电流必然会产生畸 变。电网断开后,由于电路噪声、检测误差以及电网本身的波动, Δf 不恒等于0,逆变器输出电流的截断 系数是动态变化的,为了分析方便,本研究先假设 cf 是固定不变的,并将图1中电流波形向右平移 t₄/2,使 其关于原点对称,调整后的电流波形如图2所示。

图2中输出电流中正弦波段的频率fi表示为:



图2 调整后的电流波形

则输出电流 i_{inv} 可表示如下:

$$i_{inv} = \begin{cases} -\sin[2\pi f_1(t - \frac{t_z}{2})], & \frac{t_z}{2} < t < \frac{T - t_z}{2} \\ 0, & \ddagger \psi \end{cases}$$
(3)

由于调整后的电流波形关于原点对称,本研究将 式(3)按傅里叶级数展开后只含有正弦分量,即:

$$b_n = \frac{4(cf-1)\sin(\frac{n\pi}{2}\cdot cf)}{[1-n^2(1-cf^2)]\pi}$$
(4)

当n为偶数时, $b_n=0$,所以,逆变器输出电流的 *THD* 值为:

$$THD = \frac{1}{b_1} \left[\sum_{n=3}^{\infty} b_n^2 \right]^{1/2} (n = 3, 5, 7, 9...)$$
(5)

联立式(4,5),可得到计至20次谐波时逆变器输 出电流 THD 与 cf 的关系如图3所示。从图3中可以 看出,输出电流的 THD 正比于截断系数 cf,并近似成 等值线性关系,即 THD ≈ cf 。GB/T15945—1995《电 能质量—电力系统频率差允许偏差》中规定:电力系 统正常频率偏差允许值为±0.2 Hz。最差电网情况下, 若 cf₀=0,则此时 AFDPF 法的截断系数 cf=k×0.2。



国家技术监督局发布的GB/T 14549-1993《电能质量 公用电网谐波》中明确规定:并网逆变器输出电流的 THD 不得大于5%。因此,AFDPF法的正反馈参数 k 应满足:

$$k \leq 0.25 \tag{6}$$

2 AFDPF 算法参数对 NDZ 的影响

在研究并网光伏发电系统的孤岛效应时,笔者通 常采用并联 RLC 负载模拟本地负载^[10],其在任意频率 *f* 下负载相位角为:

$$\theta_{\text{load}} = \tan^{-1}[Q_f(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f})]$$
 (7)

式中: f_0 —并联 RLC 负载的谐振频率, Q_f —负载的品 质因数。

AFDPF法在PCC点电压上产生的移相角为:

$$\theta_{\text{AFDPF}} = \frac{\pi}{2} cf = \frac{\pi}{2} [k(f - f_g) + cf_0] \tag{8}$$

当电网断开后,系统到达新的稳态时应满足相位 判据^[7],即: θ_{load} + θ_{AFDPF} =0,则:

$$f_0 = \frac{\left[-\tan\theta_{AFDPD} + \sqrt{-\tan^2\theta_{AFDPF} + 4Q_f^2}\right] \cdot f}{2Q_f} \qquad (9)$$

将 θ_{AFDPF} , $f_{max} = 50.5$ Hz 以及 $f_{min} = 49.5$ Hz 代入上 式,可得在 $Q_f \times f_0$ 坐标系下不同算法参数时 AFDPF 法 的孤岛检测盲区分布如图4所示。



图4 AFDPF法的孤岛检测盲区

曲线1: c_{f} =0.02+0.02 Δf ; 曲线2: c_{f} =0.02+0.05 Δf ; 曲线3: c_{f} =0.05+0.05 Δf

比较图中曲线1、2包围的区域可知,AFDPF法的 NDZ随着反馈参数 k 的增大而较小;从曲线2、3包围 的区域可以看出,初始截断系数 cfo 的大小并没有改 变 NDZ的大小,只改变了其在盲区图上的分布位置。 由前文分析可知, cfo 与输出电流的 THD 成正比关 系。因此,实际应用中, cfo 不宜取得过大。考虑到电 网断开瞬间负载谐振频率恰好等于电网频率时无法 启动正反馈这一特殊情况,本研究取 cfo =0.01。

3 反馈参数 k 的模糊优化

实际电网环境下,电网断开后逆变器所带负载特性是未知的,精确的 k 值与负载的对应关系很难获得,这就给针对不同负载选取合适的算法参数带来了困难。但大量仿真结果表明,PCC点电压的频率偏移以及频率变化率随扰动量的增加而增大。

基于以上特点,本研究选择 PCC 点电压频率 f_{upc} 与电网电压额定频率 f_{grid} 的偏差 e 和频差变化率 ec 作为模糊控制器的输入,输出控制量为反馈参数 k,其 模糊控制结构如图5所示。



图5 模糊控制框图

K_{e}, K_{ec}, K_{u} —量化因子

根据 GB/T 20046-2006《光伏(PV)系统电网接口 特性》规定,当电网频率超出±0.5 Hz时,并网发电系统 应停止向电网供电,则一个电网周期内频率偏差 $e \in$ [-0.5 0.5],频差变化率 $ec \in [-50 50]$,由前文可知,反 馈参数 $k \in [0 0.25]$ 。

将输入量 e 和 ec 量化在(-3,3)之中,其对应的模 糊子集 E 和 EC 分为7档: $E = EC = \{ NB(负大), NM$ (负中), NS(负小), ZE(零), PS(正小), PM(正 中), PB(正大) $\}$;同理,输出控制量 k 量化在(0,6)之 中,其对应的模糊子集 $U = \{ ZE(零), SS(较小), S$ (小), M(中), BB(较大), B(大), VB(非常大) $\}$ 。 因此,量化因子取 $K_e = 6$, $K_e = 0.06$, $K_u = 1/24$ 。

为了简化计算过程以方便实际应用,输入、输出 均采用三角形隶属度函数。

本研究根据已有的实验数据和经验总结,采用 T-S模型作为模糊规则,即"if E and EC then U"的形 式,总结出了如表1所示的模糊推理器规则。

表1 模糊控制规则表

U		E						
		NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
EC	NB	VB	В	BB	М	BB	В	VB
	NM	В	BB	М	\mathbf{S}	М	BB	В
	NS	BB	М	S	SS	\mathbf{S}	М	BB
	ZE	М	S	SS	ZE	SS	S	Μ
	\mathbf{PS}	BB	М	S	SS	\mathbf{S}	М	BB
	PM	В	BB	М	\mathbf{S}	М	BB	В
	PB	VB	В	BB	М	BB	В	VB

对于表1中的每条控制规则都可得到一个三元模 糊关系:

$$R_{ij} = (E_i \times EC_j) \times U_{ij}$$

$$\forall x \in X, \forall y \in Y, \forall z \in Z, \text{ } \square \text{ } \textbf{f}:$$
(10)

$$\boldsymbol{\mu}_{\boldsymbol{\mu}_{\boldsymbol{E}}}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y},\boldsymbol{z}) = \boldsymbol{\mu}_{\boldsymbol{E}}(\boldsymbol{x}) \wedge \boldsymbol{\mu}_{\boldsymbol{E}C}(\boldsymbol{y}) \wedge \boldsymbol{\mu}_{\boldsymbol{U}}(\boldsymbol{z})$$
(11)

对于总的控制规则所对应的模糊关系 R,用取并的方法得到:

$$R = \bigcup_{i=1,j=1}^{i=7,j=7} R_{ij}$$
(12)

其中, $\mu_R(x,y,z) = \max[\mu_{R_{ij}}(x,y,z)]_{\circ}$

根据输入量 *E* 和 *EC* 可以得出输出模糊量的模糊 集合:

$$U = (E \times EC) \circ R \tag{13}$$

$$\boldsymbol{\mu}_{\boldsymbol{U}}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y}) = \bigvee \boldsymbol{\mu}_{\boldsymbol{R}}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y},\boldsymbol{z}) \wedge [\boldsymbol{\mu}_{\boldsymbol{E}}(\boldsymbol{x}) \wedge \boldsymbol{\mu}_{\boldsymbol{E}\boldsymbol{C}}(\boldsymbol{y})]$$
(14)

由计算得到的模糊子集采用加权平均法转换成 清晰量 u',再乘以量化因子 K_u,即可得到系统的实际 控制量 k。

4 仿真分析

为了验证参数优化后的AFDPF法孤岛检测性能, 本研究在Matlab/Simulink环境下建立了孤岛检测仿真 模型,如图6所示,逆变器采用恒电流控制模式。

具体参数如下:输入电压400 V,输出电压220 V (有效值),频率50 Hz,输出功率2 kW,输出经LC滤波 后与电网连接, *L* =6 mH, *C* =3.3 μ F,以最恶劣工况下 配置本地负载参数:并联RLC负载的有功功率为2 kW, 谐振频率为50 Hz,负载品质因数 Q_f =2.5,即: *R* = 24.2 Ω , *L* =30.81 mH, C=328.83 μ F,电网在0.1 s时自 动断开。



图6 优化后的AFDPF法仿真模型 电网断开后PCC点电压波形以及频率偏移情况如 图7所示。

由于逆变器输出有功和负载所需有功功率相平 衡,电网断开后电压幅值没有发生变化;PCC点电压频 率在电网断开瞬间,负载谐振频率等于电网电压频率, 即 $\Delta f = 0$,仅在 cf_0 的作用下,PCC点电压频率正向偏移, 此后,模糊控制器自适应调整反馈参数k,形成正反馈,



使得PCC点电压频率在正反馈和 cf。的共同作用下持续偏移,直到0.2 s时被推离至50.5 Hz,检测出孤岛,逆变器封锁功率管的输出,电压逐渐衰减至0。

文献[11]给出了常规 AFDPF 法对于品质因数小于 2.5 的负载实现无盲区检测的 k 的取值范围为 $k \ge 0.07$ 。为了模拟实际电网的频率波动,本研究对电网电压频率施加幅度为±0.1 Hz 的随机干扰信号,并对不加孤岛检测算法、 $cf = 0.07\Delta f + 0.01$ 和采用优化后的AFDPF 法 3 种情况下的输出电流分别进行了 FFT 分析,得到 3 种情况下计至 20 次谐波时输出电流的 THD 如图 8 所示。

由于电路噪声、检测误差以及电网本身的波动, 不加孤岛检测算法时输出电流的 *THD* 为1.09%,因正 常并网时 $\Delta f \neq 0$, $cf = 0.07\Delta f + 0.01$ 时输出电流的 *THD* 为2.61%,优化后的 AFDPF 法为1.12%。与常规 孤岛检测算法 $cf = 0.07\Delta f + 0.01$ 相比,优化后的 AFD-PF 法输出电流的 *THD* 降低了1.49%,相比不加孤岛检 测算法时其 *THD* 增量仅有 0.03%,基本可以忽略不 计。这说明本研究优化后的 AFDPF 法可规避上述因 素对正常并网时输出电流的影响,改善常规 AFDPF 法 取固定反馈参数时的并网电流畸变率。同时,从FFT 分析结果可以看出,谐波成分主要为奇次谐波,与前 面的理论计算相一致。

5 结束语

电网因故障断开后,做到既能快速有效地检测出 孤岛又能尽量减小对电网的不良影响,对于并网光伏



发电系统有着重要的现实意义。本研究首先分析了 AFDPF法算法参数对NDZ和输出电流THD的影响, 并阐述了算法参数的选取原则,针对反馈参数选择与 输出电流THD和NDZ不可调和的矛盾,采用模糊控制 对反馈参数进行了自适应在线调整。仿真结果表明, 模糊优化后的AFDPF法具有检测时间短、无盲区以及 并网电流THD小的优点。 此外,该方法同样适用于其他基于正反馈的孤岛 检测方法的参数优化。

参考文献(References):

- [1] ZEINELDIN H H, El-SAADANY E F, SALAMA M M. Impact of DG interface control on islanding detection and non-detection zones [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(3):1515-1523.
- [2] 薄 涛,杨 滔,吕征宇.一种新的三相光伏并网系统孤 岛检测方法[J]. 机电工程,2008,25(9):34-50.
- [3] ROPP M E, BEGOYIC M, ROHATGI A. Analysis and performance assessment of the active frequency drift method of islanding prevention [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1999, 14(3):810-816.
- [4] DOUMBIA M L, AGBOSSOU K. Islanding Protection Evaluation of Inverter-based Grid Connected Hybrid Fenewable Energy Systems [C]//Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Canadian: [s.n.], 2004:1081-1084.
- [5] 邓燕妮,桂卫华.一种低畸变的主动移频式孤岛检测算法 [J].电工技术学报,2009,24(4):219-223.
- [6] 相海涛,待卫力,蒋海江,等.主动频率漂移法孤岛效应检测分析与优化[J].河海大学学报:自然科学版,2010,38
 (2):231-235.
- [7] LOPES L A C, SUN Hui-li. Performance assessment of active frequency drifting islanding detection methods [J].
 IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(1): 171–180.
- [8] 刘芙蓉,康 勇,段善旭,等.主动移频式孤岛检测方法的 参数优化[J].中国电机工程学报,2008,28(1):95-99.
- [9] YE Zhi-hong, KOWALKAR A, ZHANG Yu. Evaluation of anti-Islanding schemes based on non-detection zone concept [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(5):1171-1176.
- [10] IEEE Std. 929-2000. IEEE recommended practice for utility Interface of photovoltaic (PV) systems [S]. New York: IEEE,2000.
- [11] 刘方锐,康 勇,张 宇,等.带正反馈的主动移频孤岛检测 法的参数优化[J].电工电能新技术,2008,27(3):22-25.

[编辑:李 辉]

(上接第209页)

- [6] MANN G K I, HU Bao-gang, GOSINE R G. Analysis of direct action fuzzy PID controller structures[J]. IEEE Transactions on system Man and Cybernetics Part B-Cybernetics, 1999, 29(3): 371-388.
- [7] 刘钟宇,王雪峰,栾 兰. RS485/232电平转换器研制[J]. 微处理机,2008,29(3):45-46
- [8] 王 葳, 张永科, 刘鹏鹏, 等. 无刷直流电机模 PID 控制系

统研究与仿真[J]. 计算机仿真, 2012, 29(4): 196-199.

- [9] 李 兵,方 敏,汪洪波. 模糊 PID 液位控制系统的设计与 实现[J]. 合肥工业大学学报:自然科学版,2006,29(11): 1370-1374.
- [10] 吴影清,刘廷章,袁 文,等. 电机调速性能在线监控平台 设计[J]. 微电机,2010,43(12):90-93.

[编辑:李 辉]