基于模型预测控制的并网逆变器开关损耗优化方法

杨兴武,冀红超,甘 伟

(上海电力学院 电气工程学院,上海 200090)

摘要:提出一种应用于单相并网逆变器的可降低开关损耗的模型预测控制方法。该方法基于单相逆变器的离散状态模型,首先加入参考电流方向的判断,对开关状态进行初步筛选并且闭锁部分器件的状态,设置电流跟踪差为指标函数,将筛选出的开关状态代入指标函数进行寻优,选出可使指标函数最小的开关状态;其次引入降损指标函数,判断当前时刻的控制误差,若控制误差在限定范围,保持前一时刻开关状态输出,否则根据当前时刻指标函数最小值更新开关状态,从而大幅降低系统开关频率。该控制方法原理简单、数字化控制易于实现,与传统的控制方式相比,其不用整定 PI 参数,且系统具有较强鲁棒性。仿真结果表明控制器对并网电流跟踪性能良好,大幅降低了开关频率。

关键词:模型预测控制;开关状态;跟踪控制;开关频率;优化;逆变器 中图分类号:TM 862;TM 464 文献标识码:A DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.08.013

0 引言

近年来,为了保障我国的能源安全,新能源的利 用得到广泛重视,并网逆变器作为新能源与电网的 接口,其控制技术的先进性对新能源的发展至关重 要。目前,应用于单相并网逆变器的控制策略有比 例积分控制、电流滞环控制、比例谐振控制、电流预 测控制、电流模型预测控制等。比例积分控制应用 广泛,控制思想简单,可采用频域分析和极点配置方 法进行参数设计,存在的问题是稳态误差难以消除、 参数设计较复杂;电流滞环控制方法简单,动态响应 快,性能好,但要求系统采样精度高,导致开关频率 高,系统开关频率的不固定使得滤波器设计困难^[1]: 定频的滞环控制能够取得较好的控制效果,并且能 够改善电流频谱特性,但使得控制过程变得复杂,控 制精度降低[2-9]:电流预测控制属于线性控制的范畴, 具有控制精度高、电流谐波含量小等优点,但存在的 问题是对模型参数准确性依赖比较强:电流模型预 测控制是近年发展起来的一种控制方法,利用系统 离散模型,通过设置指标函数直接选择开关状态,实 现目标变量的直接跟踪控制,这种控制方法原理简 单、设计容易、电流响应速度快、易于数字化实现,但 存在的问题是计算量大.开关频率比较高[10-15]。

本文在电流模型预测控制的基础上,提出了一种应用于单相并网逆变器的模型预测控制优化方

法。该方法在模型预测控制的基础上加入参考电流 方向的判断并引入一个降损指标函数来实现开关损 耗的优化,加入电流方向判断可以预先确定和闭锁 部分开关状态,以此来降低开关频率,加入一个降损 指标函数可以减少一些小扰动带来的开关误动,从 而进一步降低系统开关频率。这种控制方法具有物 理模型清晰、数字化控制易于实现等一系列优点,与 传统的控制方式相比,其不用整定 PI 参数,且系统 具有较强稳定性。仿真结果表明控制器对并网电流 跟踪性能良好,开关频率较低。

1 开关损耗经过优化的单相并网逆变器离 散数学模型

单相并网逆变器的电路原理图如图1所示。



图 1 单相并网逆变电路图

Fig.1 Circuit of single-phase grid-connected inverter

传统单相并网逆变器的开关状态有 4 种,其开 关状态如表 1 所示,表中 $S_1 - S_4$ 分别为器件 $V_{T1} - V_{T4}$ 的状态,取值为 0 表示关断,取值为 1 表示开通。

> 表 1 传统单相逆变器的开关状态 Table 1 Switching states of traditional

single-phase inverter

S_1	S_2	S_3	S_4	开关状态
1	0	0	1	S(1)
1	0	1	0	S(2)
0	1	1	0	S(3)
0	1	0	1	S(4)

收稿日期:2015-01-08;修回日期:2015-07-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51207086);上海市教 育委员会科研创新项目(14YZ126);上海绿色能源并网工程 技术研究中心资助项目(13DZ2251900)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51207086),Innovation Program of Shanghai Municipal Education Commission (14YZ126) and Shanghai Engineering Research Center of Green Energy Grid-Connected Technology (13DZ2251900)

在传统的单相并网逆变器模型预测控制中,要把全部4种开关状态分别代入系统的离散模型,选出可使指标函数最小的开关状态。这种方法存在的问题是,每一次寻优计算,这4种开关状态都有可能被选中,这样每个开关在整个工频周期内都会有开关动作,基于单极性的 PWM 思想,实际上每个开关只需工作半个工频周期就可以完全实现同样的功能。于是本文提出了一种开关状态经过优化的模型预测控制方法,具体实现方式如下。

如图 1 所示,当参考电流在正半周期时, V_{T1} 保 持通态, V_{T2} 和 V_{T3} 保持断态,当 V_{T4} 导通时,其电流 流向图如图 2(a)所示;当 V_{T4} 关断时, V_{D3} 实现续流, 其电流流向图如图 2(b)所示;当参考电流在负半周 期时, V_{T2} 保持通态, V_{T1} 和 V_{T4} 保持断态,当 V_{T3} 开通 时,其电流流向图如图 2(c)所示; V_{T3} 关断时,电流经 过 V_{D4} 进行续流,其电流流向图如图 2(d)所示。



图 2 优化后的 4 种开关状态

Fig.2 Four switching states after optimization

通过这种控制方式,使得开关管 V_{T1}、V_{T2}每一个 工频周期只开通和关断一次,开关管 V_{T3}、V_{T4} 只工作 半个工频周期,可显著降低开关频率。

根据图 2 所示的 4 种开管状态,单相并网逆变

器的开关状态函数定义为 Sa、Sb 如表 2 所示。

表 2 开关损耗优化后的开关状态

Table 2	Switching	states	afte
quitabi	ng loog or	stimiza	tion

			0	1		
S_1	S_2	S_3	S_4	开关状态	$S_{\rm a}$	$S_{ m b}$
1	0	0	1	S(1)	1	0
1	0	0	0	S(2)	1	1
0	1	1	0	S(3)	0	1
0	1	0	0	S(4)	0	0

逆变器的开关状态矢量定义为:

$$S(j) = S_{a} + aS_{b} \tag{1}$$

逆变器输出侧电压值 u 可表示为:

$$u(j) = U_{dc}S(j) \tag{2}$$

其中,U_{de}为直流侧电压值。

根据图 1,由基本电路原理得到系统模型:

$$u = Ri + L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} + e \tag{3}$$

其中, R 为等效电阻; L 为交流电抗电感量; u 为逆变器交流输出电压; e 为电网电压。

设系统采样时间为 T_s,则并网电流的微分可近 似表示为:

$$\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} \approx \frac{i(k) - i(k-1)}{T_{\mathrm{s}}} \tag{4}$$

将式(4)代入式(3),并将步长加1得i(k+1)为: $i(k+1) = \frac{1}{RT_s+L} [Li(k) + T_su(k+1) - T_se(k+1)]$ (5) 其中,i(k)为当前时刻的并网电流值。

2 开关损耗经过优化的模型预测控制

2.1 开关损耗经过优化的模型预测控制方法

开关损耗经过优化的模型预测控制结构图如图 3 所示,控制策略有以下 4 个步骤:

a. 计算逆变器的交流输出电压值:

b. 根据电流方向对输出电压进行初步筛选;

c. 构建并网电流的预测模型:

d. 定义指标函数 G_1 和 G_2 , 计算最优开关状态。

开关损耗经过优化的模型预测控制具体实现过 程如下。

首先由式(2)得到4种开关状态对应的电压值 u(1)、u(2)、u(3)和u(4)。根据电流方向预先筛选 出2个电压值。当参考电流在正半周期时,选取电 压值u(1)和u(2)。当参考电流在负半周期时,选取 电压值u(3)和u(4)。然后将所选电压值和系统检 测量代入式(5),根据系统的离散模型得到并网电流 的预测值。

然后设定如下指标函数 G_1 和 G_2 :

$$G_1(k) = |i^*(k) - i(k)|$$
(6)



图 3 模型预测控制结构图

Fig.3 Structure of model predictive control

 $G_2 = G_{\text{lmin}}(k)$ (7) 其中, $i^*(k)$ 为并网电流的参考值; $G_{\text{lmin}}(k)$ 为指标函数 $G_1(k)$ 的最小值。

评估不同电压值作用下指标函数 *G*₁值的大小, 选取指标函数 *G*₁最小值,将其代入降损指标函数 *G*₂ 判断控制误差,若控制误差在限定范围,保持前一时 刻开关状态输出,控制误差超出限定范围时,选取当 前时刻指标函数 *G*₁最小值对应的开关状态,从而实 现并网电流的跟踪控制。

2.2 模型预测控制的稳定性分析

在分析模型预测控制的稳定性之前,首先要对 模型预测控制进行数学建模,通过式(3),忽略等效 电阻 R 的影响,可以得到离散后的电压方程为:

$$u(k) = \frac{L}{T_{s}} [(i(k) - i(k-1)) + e(k)]$$
(8)

离散后的参考电压方程为:

$$u^{*}(k) = \frac{L}{T_{s}} \left[\left(i^{*}(k) - i(k-1) \right) + e^{*}(k) \right]$$
(9)

其中,u*(k)为并网逆变器输出电压参考值;e*(k)为 电网电压参考值。

将式(8)和式(9)相减得可得 u(k)的表达式为:

$$u(k) = u^{*}(k) - \frac{L}{T_{s}}i_{e}(k)$$
(10)

其中, $i_{e}(k) = i^{*}(k) - i(k)_{\circ}$

根据拉格朗日的二阶外推公式¹⁸,u*(k)可表示为:

 $u^{*}(k) = 3u(k-1) - 3u(k-2) + u(k-3)$ (11) 同理, $i_{e}(k)$ 可表示为:

$$i_{e}(k) = 3i_{e}(k-1) - 3i_{e}(k-2) + i_{e}(k-3)$$
 (12)
将式(10)和式(11)代人式(9)可得:

u(k) = 3u(k-1) - 3u(k-2) + u(k-3) -

$$\frac{L}{T_{\rm s}} [3i_{\rm e}(k-1) - 3i_{\rm e}(k-2) + i_{\rm e}(k-3)]$$
(13)

根据式(13)和式(5)可得模型预测控制的传递 函数如图 4 所示。 忽略电网的扰动 e(k),由模型预测控制的传递 函数框图,可得模型预测控制的传递函数为:

$$G(z) = \frac{3z^2 - 3z + 1}{z^4 - 4z^3 + 9z^2 - 7z + 2}$$
(14)

上述控制系统的幅频特性曲线如图 5 所示。



Fig.5 Amplitude-frequency curve of model predictive control

从图 5 可以看出,模型预测控制有足够的幅频 裕度(*G*_m=inf)和相频裕度(*P*_m=inf),说明模型预测控 制具有很强的稳定性。

2.3 模型预测控制的程序流程图

根据模型预测控制的相关原理及算法其程序流 程图如图 6 所示。

首先根据参考电流的方向选取 2 个开关状态对 应的输出电压,然后将所选输出电压和检测量代入 系统离散模型,计算并网电流预测值。将这些并网 电流的预测值和给定值代入指标函数 G_1 ,选取指标 函数 G_1 最小值。然后将当前时刻指标函数 $G_2 \leq \varepsilon$ 时,开 值代入降损指标函数 G_2 。当指标函数 $G_2 \leq \varepsilon$ 时,开 关状态保持不变,当指标函数 $G_2 > \varepsilon$ 时,根据指标函 数 G_1 最小值更新开关状态,从而实现并网电流的跟 踪控制。

结合滞环控制的思想, ε 的取值为 λi^* ,其中 i^* 为 电流参考值, λ 为误差系数。误差系数的取值可经过 测试选取。





图 6 模型预测控制的程序流程图 Fig.6 Flowchart of model predictive control

3 仿真分析

为了验证本文所提出的开关损耗经过优化的 模型预测控制效果,在 MATLAB 中进行了对比仿真 实验。仿真模型中的参数设置如下: U_{de} =500 V,R= 0.5 Ω ,L=5 mH,e=220 V,T_s=100 μ s,在 t=0.305 s 时, 并网电流指令阶跃变化,测试并网跟踪控制效果。

开关损耗优化前的仿真结果如图7所示。

在开关损耗优化后的仿真中,考虑到平均开关 频率和电流控制效果,经过仿真测试 *ε* 取 | 0.07*i** | 仿 真结果如图 8 所示。

通过图 7 和图 8 可以看出,2 种控制方法都实 现了并网电流的快速跟踪,并展现出良好的动态性 能;当 *ε* 在合适的范围内时,开关损耗优化后的电流 跟踪误差比开关损耗优化前的电流跟踪误差要小, 这是因为开关损耗经过优化后减少了一些小扰动带 来的开关误动。还可以发现开关损耗优化前的电流 跟踪误差最大值出现在峰值处,而开关损耗优化后 的电流跟踪误差最大值出现在过零点处,一定程度 上提高了系统的控制精度。通过开关器件的驱动信 号可以看出,类似单极性的调制方式可使一个桥臂 的 2 个开关器件工作在工频,另一个桥臂 2 个开关 器件的平均开关频率由 11 kHz 降低到 3.4 kHz,大幅 减小了开关器件的平均开关频率,从而显著降低了 系统开关损耗。 从电流频谱分析结果看出,开关损耗优化之后, 并网电流总畸变率由原来的 3.41%降低到 2.35%, 显著改善了波形输出,值得关注的是,3次、5次谐波 含量有所增加,主要是因为电流过零点附近仍然闭 锁部分开关器件,导致寻优计算出的电压对电流的 控制效果有所降低;也可从开关器件的驱动波形来 分析,电流过零附近,大部分开关器件都处于关断状 态,平均开关频率很低,多数情况电流经过二极管续 流,从而引起 3次、5次谐波的增加。





图 8 开关损耗优化的仿真波形 Fig.8 Simulative waveforms after switching loss optimization

4 结论

本文提出了一种应用于单相并网逆变器的开关 损耗经过优化的模型预测控制方法。这种控制方法 是在模型预测控制的基础上加入单极性的调制思想 和滞环的控制思想来实现的。单极性的调制思想体 现在,通过加入指令电流方向判断,预先确定部分输 出电压和闭锁部分开关状态。滞环的控制思想体现 在降损指标函数控制误差的选取。理论分析和仿真 表明,该方法具有物理模型清晰、数字化控制易于实 现、开关频率低、损耗少等优点,与传统的控制方式 相比,其不用整定 PI 参数,且系统具有较强稳定性。

参考文献:

- 赵清林,郭小强,邬伟扬. 单相并网逆变器控制技术研究[J]. 中国电机工程学报,2007,27(16):60-64.
 ZHAO Qinglin,GUO Xiaoqiang,WU Weiyang. Research on control strategy for single-phase grid-connected inverter[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(16):60-64.
- [2] 邹晓,易灵芝,张明和,等.光伏并网逆变器的定频滞环电流控制 新方法[J].电力自动化设备,2008,28(4):58-62.
 ZOU Xiao,YI Lingzhi,ZHANG Minghe, et al. Constant-frequency hysteresis current control of PV grid-connected inverter[J]. Electric Power Automation Equipment,2008,28(4):58-62.
- [3]黄金军,郑建勇,尤鋆,等. 基于电流滞环控制的 Z 源三相光伏并 网系统[J]. 电力自动化设备,2010,30(10):94-97.
 HUANG Jinjun,ZHENG Jianyong,YOU Jun, et al. Z-source three-phase grid-connected PV system based on current hysteresis control [J]. Electric Power Automation Equipment, 2010,30(10):94-97.
- [4] 洪峰,单任仲,王慧贞,等. 一种变环宽准恒频电流滞环控制方法
 [J]. 电工技术学报,2009,24(1):115-119.
 HONG Feng,SHAN Renzhong,WANG Huizhen, et al. Varied hysteresis-band current controller with fixed switching frequency
 [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2009,24(1): 115-119.
- [5] 陈东华,纪志成.适用于飞机电网的并联型有源电力滤波器功率 电路及其控制策略[J].电网技术,2008,32(13):75-79. CHEN Donghua,JI Zhicheng. Power circuit of shunt active power filter suitable to aircraft power supply network and its control strategy[J]. Power System Technology,2008,32(13):75-79.
- [6] 谈龙成,陈永刚,常国洁,等. 有源电力滤波器的电流控制新方法
 [J]. 电网技术,2006,30(21):62-65.
 TAN Longcheng,CHEN Yonggang,CHANG Guojie,et al. A novel current control method for active power filter[J]. Power System Technology,2006,30(21):62-65.
- [7]郑建勇,王杰,梅军,等. 基于电压空间矢量的滞环电流控制方法和APF的系统设计[J]. 电力自动化设备,2011,31(5):49-52.
 ZHENG Jianyong,WANG Jie,MEI Jun, et al. Hysteresis current control based on voltage space vector and APF system design [J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(5):49-52.
- [8] 栗晓政,孙建平,甄晓亚,等. 基于 PR 与 PI 联合控制策略的光伏 并网系统直流注入抑制技术[J]. 电力自动化设备,2013,33(3): 118-122.

LI Xiaozheng, SUN Jianping, ZHEN Xiaoya, et al. DC injection suppression technology based on PR & PI integrated control for grid-connected PV system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(3):118-122.

- [9] 孟建辉,石新春,付超,等. 基于 PR 控制的光伏并网电流优化控制[J]. 电力自动化设备,2014,34(4):42-47.
 MENG Jianhui,SHI Xinchun,FU Chao, et al. Optimal control of photovoltaic grid-connected current based on PR control [J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(4):42-47.
- [10] RODRIGUEZ J, PONTT J, SILVA C A, et al. Predictive current control of a voltage source inverter[J]. IEEE Transactions on Industry Electronics, 2007, 54(1):495-503.

89

- [11] JEONG S J,KIM B W,SONG S H. Improvement of predictive current control performance using on-line parameter estimation in phase controlled rectifier [J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2007,22(5):1820-1825.
- [12] HOSSEIN M K,IDRIS A G,LIUCHEN C,et al. A novel DSPbased current-controlled PWM strategy for single phase grid connected inverters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2006,21(4):985-993.
- [13] BODE G H,LOH P C,NEWMAN M J,et al. An improved robust predictive current regulation algorithm [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005, 41(6):1720-1733.
- [14] HOLTZ J. Pulse width modulation-asurvey[J]. IEEE Transactions on Industry Electronics, 1992, 39(5):410-420.

[15] CORTES P,RODRIGUEZ J,QUEVEDO D E,et al. Predictive current control strategy with imposed load current spectrum[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2008,23(2);612-618.

作者简介:



杨兴武(1981—),男,河南邓州人,副教 授,博士,主要研究方向为有源电力滤波、无 功补偿及新能源并网技术(E-mail:yxw790930 @sohu.com);

冀红超(1991—),男,河南邓州人,硕士 研究生,主要研究方向为新能源发电与并网 技术。

Switching loss optimization based on model predictive control for grid-connected inverter

YANG Xingwu, JI Hongchao, GAN Wei

(College of Electrical Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: A method based on the model predictive control is proposed to decrease the switching loss of single-phase grid-connected inverter. It detects the current direction based on the discrete state model of the inverter to select the switching state preliminarily and to block the states of some devices, takes the tracking current difference as the index function and substitutes the selected switching state into the index function to search the optimal switching state resulting in the minimum index function. A loss reduction function is then introduced to evaluate the current control error, if the error does not exceed the limit, the switching state output remains, otherwise changes the switching state output according to the present minimum of index function to significantly reduce the system switching frequency. The proposed control method is simple in principle and easy to implement the digital control. Compared with traditional control methods, the system is more robust and no PI parameters are needed. Simulative results show that, the controller tracks the grid-connection current well and the switching frequency is greatly reduced.

Key words: model predictive control; switching state; tracking control; switching frequency; optimization; electric inverters

(上接第 83 页 continued from page 83)

Optimal installation location selection based on eigenvector analysis for battery energy storage device

DU Bingxin, WANG Delin

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: A mathematic model of CBEST(Cell and Battery Energy STorage) is built to analyze the effect of its installation location on the results of power compensation for selecting its optimal installation location. The user-defined module of PSS/E is applied to establish a model of CBEST control system. The small signal analysis method is adopted to analyze the feasibility of applying the eigenvector method to the optimal installation location selection of energy storage device and the calculation process of eigenvector modulus is given. The correctness and effectiveness of eigenvector indicators used in the optimal installation location selection of energy storage device are verified by the simulative results of IEEE 9-bus system.

Key words: electric batteries; energy storage; optimal position; eigenvector method; PSS/E user-defined module