

# 基于 Simulink 的单相光伏 并网逆变器仿真研究

毛洪生, 毛行奎, 裴昌盛

(福州大学 电气工程与自动化学院, 福建 福州 350108)



毛洪生 (1984—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子新能源发电技术。

**摘 要:** 针对光伏电池输出电压范围宽的特点, 提出了一种准两级主电路拓扑的单相光伏并网逆变器方案, 并建立了基于 Simulink 的, 包括光伏电池模型在内的光伏发电系统仿真模型。仿真结果表明, 系统采用的改进变步长扰动观察法, 可有效减小最大功率点跟踪时的振荡; 无差拍控制保证并网输送的电能质量高; 有源频率漂移法能快速、有效地实现孤岛保护。仿真验证了所采用的光伏系统方案的可靠性和先进性, 为试验样机开发提供了很好的仿真基础。

**关键词:** 光伏并网逆变器; 最大功率点跟踪; 无差拍控制

**中图分类号:** TM 464<sup>+.9</sup> **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-5531(2011)06-0028-06

## Simulation and Research of Single-phase Grid-connected Photovoltaic Inverter Based on Simulink

MAO Hongsheng, MAO Xingui, PEI Changsheng

(School of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

**Abstract:** Aiming at the characteristic of photovoltaic cells as wide range of output voltage, a single-phase PV grid-connected inverter solution with a new quasi-two-stage circuit topology was proposed. Based on Simulink, the simulation model of the grid-connected photovoltaic system including PV model was established. The simulation results showed that improved perturbation and observation method with variable step could reduce the oscillation effectively when during maximum power point tracking (MPPT). Deadbeat control method could make can the grid-connected photovoltaic system output the high-quality power energy. Active frequency drift method can achieve islanding protection rapidly and effectively. The simulation results showed the reliability and advancement of the photovoltaic system solution, and provided a good simulation foundation for experimental prototype development.

**Key words:** grid-connected photovoltaic inverter; maximum power point tracking (MPPT); deadbeat control

## 0 引 言

随着世界人口的持续增长和经济的不断发展, 人类正面临着能源危机和温室效应的考验。要摆脱该困境, 就必须大力开发新能源, 而太阳能就是清洁、无污染, 且可再生的新能源。太阳能具有以下优点: ① 是人类可以利用的最丰富的能源; ② 是理想的清洁能源, 无污染、无噪声; ③ 太阳能发电不用燃料, 运行成本低; ④ 太阳能发电

为分布式电力系统, 安全、可靠; ⑤ 光伏建筑集成, 大大节省了发电基地使用的面积和费用, 很适合在大城市推广<sup>[1]</sup>。

本文通过 Matlab/Simulink, 对包括光伏电池等的单相光伏并网发电系统最大功率点跟踪 (Maximum Power Point Tracking, MPPT)、并网电流控制、孤岛保护等关键技术进行建模仿真。其中, MPPT 控制采用改进变步长扰动观察法, 且放在后级逆变桥实现; 并网电流采用无差拍控制; 孤

毛行奎 (1978—), 男, 副教授, 博士, 研究方向为电力电子高频磁技术、电力电子变换技术。

裴昌盛 (1985—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子高频磁技术。

岛保护采用有源频率漂移法 (Active Frequency Drift, AFD)。建模仿真的并网光伏逆变器的输入光伏电压为 150 ~ 500 V, 输出为 1.5 kW/230 V。

1 主电路拓扑

为满足 150 ~ 500 V 的宽范围光伏电池输入电压及高效率要求, 并网逆变器采用准两级式电路拓扑, 即当光伏电池电压  $U_{pv} < 380$  V 时, 前级 Boost 升压电路工作, 将  $U_{pv}$  升压到 410 V, 再经过后级全桥逆变并实现并网, 工作于两级模式; 当  $U_{pv} \geq 380$  V 时, Boost 电路不工作,  $U_{pv}$  直接供电给全桥逆变电路, 然后并网, 工作于单级模式, 如图 1 所示。

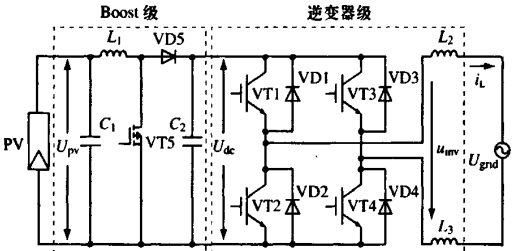


图 1 宽输入电压单相并网光伏逆变器主电路拓扑

2 光伏电池建模

在任意太阳辐射强度  $R$  和环境温度  $T_a$  条件

下, 光伏电池温度  $T_c$  为

$$T_c = T_a + t_c R \tag{1}$$

式中  $R$ ——光伏电池斜面上的总太阳辐射

$t_c$ ——光伏电池的温度系数

设在参考条件下, 短路电流为  $I_{sc}$ , 开路电压为  $U_{oc}$ , 最大功率点电压和电流为  $U_m, I_m$ , 当光伏电池电压为  $U$  时, 对应电流为  $I$ , 则

$$I = I_{sc} (1 - C_1 (e^{\frac{U}{C_2 U_{oc}}} - 1)) \tag{2}$$

$$C_1 = (1 - I_m / I_{sc}) e^{-\frac{U_m}{C_2 U_{oc}}}$$

$$C_2 = (U_m / U_{oc} - 1) / \ln(1 - I_m / I_{sc})$$

考虑太阳辐射变化和温度影响时

$$I = I_{sc} (1 - C_1 (e^{\frac{U}{C_2 U_{oc}}} - 1)) + dI \tag{3}$$

其中,

$$dI = \alpha (R / R_{ref}) dT + (R / R_{ref} - 1) I_{sc}$$

$$du = -\beta dT - R_s dI$$

$$dT = T_c - T_{ref}$$

式中  $R_{ref}$ ——太阳辐射参考值, 一般取 1 kW/m<sup>2</sup>

$T_{ref}$ ——光伏电池温度参考值, 一般取 25 °C

$\alpha$ ——在参考日照下的电流变化温度系数

$\beta$ ——在参考日照下的电压变化温度系数

$R_s$ ——光伏电池的串联电阻

根据上述数学模型, 建立基于 Simulink 的光伏电池仿真模型, 如图 2 所示。通过界面参数, 可

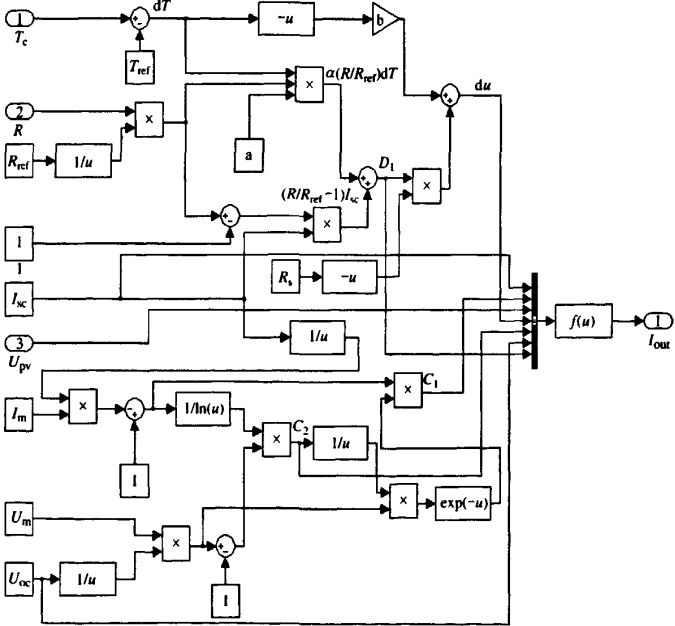


图 2 光伏电池 Simulink 仿真模型

很方便地设置光伏电池的  $I-U$  曲线,从而模拟光伏电池。

### 3 改进变步长扰动观察法 MPPT

扰动观察法 (Perturbation and Observation, PO) 以结构简单、观测参数较少、容易实现最大功率跟踪 MPPT 等优点而得到广泛应用。但其缺点也比较明显,存在由于寻优步长固定而导致 MPPT 寻优时振荡。论文[3]提出的改进变步长扰动观察法,虽能减小振荡,但也存在不适用于环境温度、光照变化场合的缺点。本文采用改进变步长扰动观察法,不仅可减小传统扰动观察法在最大功率点附近存在的振荡,且在稳态情况下可达到无振荡损耗,提高系统的效率,同时也适用于环境变化的场合。改进变步长扰动观察法的思想为:给定一个扰动,通过扰动前后功率和电压的变化来决定下一个扰动的方向和步长,使其向最大功率点不断靠近,最终实现 MPPT。改进变步长扰动观察法算法,首先设定逆变器并网参考电流  $I_{ref}$ 、扰动步长  $Step$  及常数  $Cons$  等的初始值;然后,采样光伏电池的电压、电流,计算光伏电池输出功率变化量  $\Delta P$  和电压变化量  $\Delta U$ ,  $\Delta P$  的值决定扰动步长是否改变,如果  $\Delta P \geq 0$ ,则步长保持不变;反之,当  $\Delta P < 0$ ,则认为到达最大功率点附近,将扰动步长减小;最后,  $\Delta P \times \Delta U$  的值决定了扰动的方向,如果  $\Delta P \times \Delta U > 0$ ,保持原扰动方向;如果  $\Delta P \times \Delta U < 0$ ,改变扰动方向;如果  $\Delta P \times \Delta U = 0$ ,则停止扰动,如此循环,直到  $Step$  为零,最终实现 MPPT。当环境发生变化时,即检测到  $\Delta U$  发生变化,  $Step$  赋初值,重复以上步骤,从而可以适用于环境变化场合,其流程图如图3所示。

### 4 无差拍并网逆变电流控制

并网逆变器电流控制目的是,使逆变器输出电流与电网电压同频、同相,从而实现向电网高功率因数、低畸变率及高可靠输送电能。逆变器无差拍控制具有动态响应速度快、精度高、输出电流畸变率小等优点,为并网逆变器一种高性能控制方法<sup>[4]</sup>。并网逆变器无差拍电流控制方程,即开关管占空比  $D(k)$  控制方程推导如下。

根据图1,逆变级回路电压方程为

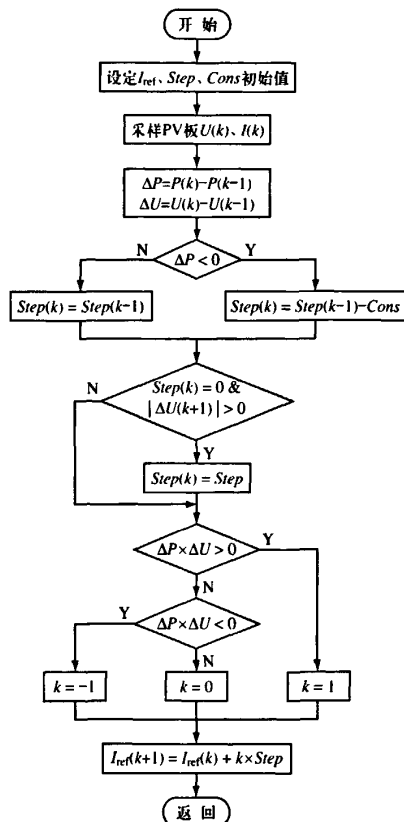


图3 改进变步长扰动观察法 MPPT 流程图

$$u_{inv}(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} + R_L i_L(t) + u_{grid}(t) \quad (4)$$

离散差分方程为

$$\begin{aligned} \bar{u}_{inv}(k) = & \frac{L}{T_s} [i_L(k+1) - i_L(k)] + \\ & R_L i_L(k) + \bar{u}_{grid}(k) \end{aligned} \quad (5)$$

式中  $\bar{u}_{inv}(k)$ ——第  $k$  个采样周期逆变器输出电压平均值

$T_s$ ——采样周期,同时也是功率管的开关周期

$i_L(k)$ ——第  $k$  个采样周期电感电流值

$\bar{u}_{grid}(k)$ ——第  $k$  个采样周期电网电压平均值

要使逆变器输出电流与电网电压同频、同相,只要使电感电流  $i_L$  能时刻跟踪与电网电压同频、同相的给定参考电流  $i_{ref}$ ,即只要用  $i_{ref}(k+1)$  替换式(5)中  $i_L(k+1)$ ,即可得

$$\bar{u}_{inv}(k) = \frac{L}{T_s} [i_{ref}(k+1) - i_L(k)] + \frac{R_L i_L(k) + \bar{u}_{grid}(k)}{U_{dc}} \quad (6)$$

则占空比  $D(k) = \frac{\bar{u}_{inv}(k)}{U_{dc}}$  为

$D(k) =$

$$\frac{L}{T_s} [i_{ref}(k+1) - i_L(k)] + \frac{R_L i_L(k) + \bar{u}_{grid}(k)}{U_{dc}} \quad (7)$$

根据上述数学模型, 建立基于 Simulink 的单相并网逆变器无差拍控制仿真模型, 如图 4 所示。

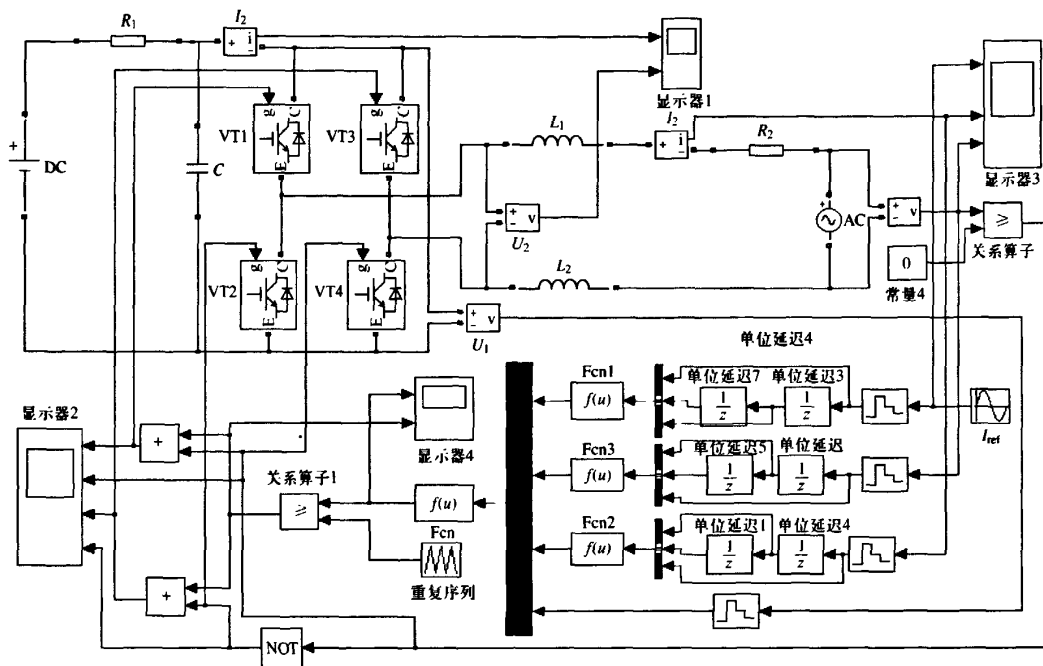


图 4 单相并网逆变器无差拍控制 Simulink 仿真模型

## 5 有源频率漂移法

光伏发电并网多属于分布式发电系统, 特别对于户用型或者与建筑集成的光伏发电。对于分布式的光伏并网发电, 当电力公司供电因故障事故或停电维修而中断时, 如果分布式光伏发电系统未能及时检测出停电状态而将自身切离电网, 光伏并网发电系统将同周围的负载形成一个电力公司无法控制的自给供电孤岛<sup>[5]</sup>, 即所谓的孤岛效应。孤岛效应不仅会影响电网系统的稳定性, 而且可能造成维护人员人身伤亡等严重后果。对此, 光伏并网发电系统须采取孤岛检测和保护技术。孤岛保护有主动式和被动式两种检测方法, 本文采用主动式检测方法, 即有源频率漂移法<sup>[6]</sup> (Active Frequency Drift, AFD)。AFD 算法的思想是, 通过控制逆变器输出电流的频率, 使其与电网

电压频率存在一定的误差  $\Delta f$  ( $\Delta f$  在并网标准允许范围内)。当电网正常工作时, 由于受电网电压的箝位作用, 逆变器输出的电压频率不会发生变化。当电网出现故障时, 由于失去了电网电压的箝位, 逆变器输出电压频率将由逆变输出电流决定变为  $f_{grid} + \Delta f$ ; 在下一个周期, 逆变器输出电流的频率  $f_{inv}$  将以此为基础加上  $\Delta f$ , 使逆变器输出电压频率与电网电压频率误差进一步扩大; 如此重复, 直至逆变器输出电压频率超出并网标准时, 需认为发生孤岛, 实行孤岛保护。AFD 算法流程如图 5 所示。

## 6 仿真结果与分析

基于上述分析和建模, 在 Matlab Simulink 环境下建立一个输出 1.5 kW/230 VAC 单相光伏并网发电系统仿真模型, 如图 6 所示。其中, 由于光

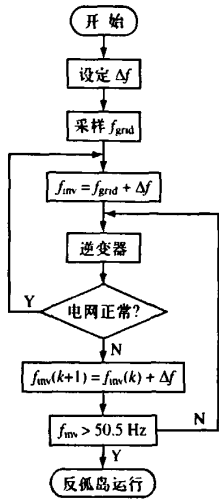


图5 AFD 孤岛保护控制流程图

伏电池的输入电压范围大,光伏发电系统的主电路为准两级结构为能在全范围内都能实现MPPT,故放在逆变桥级实现。模型主要参数如下:光伏电池开路电压  $U_{oc} = 262.62\text{ V}$ ,短路电流  $I_{sc} = 7.86\text{ A}$ ,最大功率点电压  $U_m = 204.36\text{ V}$ ,最大功率点电流  $I_m = 7.34\text{ A}$ ,最大功率  $P_m = 1\,500\text{ W}$ 。Boost 变换器和全桥逆变电路的开关频率均为  $20\text{ kHz}$ ,Boost 电感  $L_1 = 2\text{ mH}$ ,直流母线电容  $C_2 = 940\text{ }\mu\text{F}$ ,逆变桥输出滤波电感  $L_2 = L_3 = 2\text{ mH}$ ,电阻  $R_{load} = 30\text{ }\Omega$ ,仿真步长  $T_s = 1\text{e}^{-7}\text{ s}$ 。仿真结果如图7~图9所示。

由图7可见,无差拍控制方法可使逆变输出的并网电流  $i_L$  很好地跟踪参考电流  $i_{ref}$  的变化,同时与电网电压  $u_{grid}$  同频、同相。应用 Simulink Powergui 模块的 FFT 分析,对并网电流进行谐波

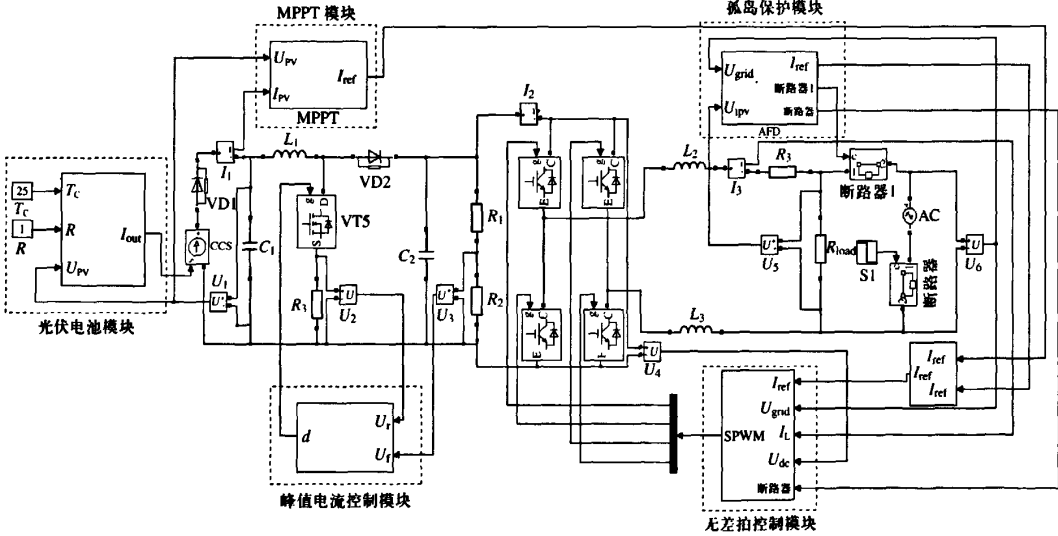


图6 单相并网光伏逆变器 Simulink 系统仿真模型

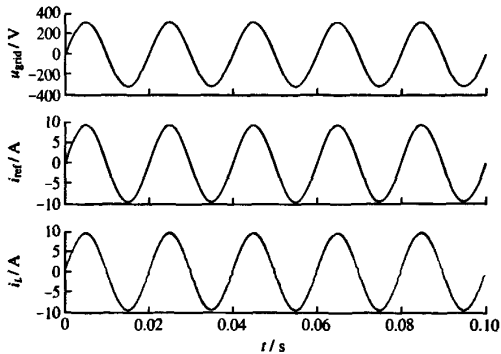


图7 并网仿真波形

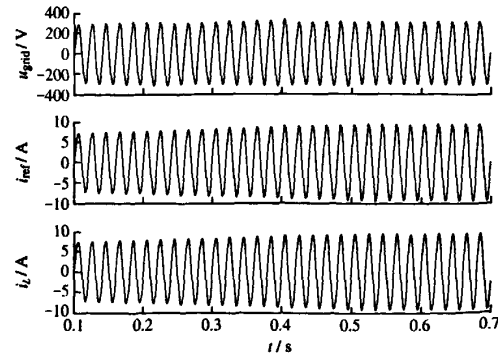


图8 MPPT 仿真波形

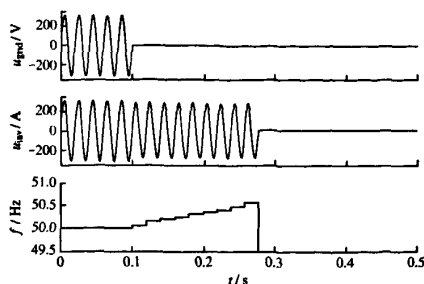


图9 孤岛保护仿真波形

分析,得到  $THD = 1.54\%$ 。

由图8可见,逆变输出电流  $i_L$  以一定步长不断增大,输出功率也不断增大,当逆变输出电流保持不变时,系统输出的功率达到最大,实现MPPT。仿真中取  $\text{Cons} = 0.01$ ,此时,MPPT的效率可达到99.89%。

由图9可见,当电网在0.1 s时断电,逆变器输出频率  $f$  不断增大,系统经过若干个周期,检测出频率  $f$  超出并网标准50.5 Hz,认为发生孤岛,随即将逆变器与电网断开,同时停止逆变器的工作,快速、有效地防止了孤岛效应。

## 7 结 语

本文提出的准两级逆变器主电路拓扑结构,不仅可满足光伏电池输入电压范围宽特点,而且

效率高。系统采用的改进变步长扰动观察法,可有效减小甚至消除扰动观察法在最大功率点附近存在的振荡损耗。建模仿真结果表明,无差拍控制的并网电流具有响应速度快、跟踪效果好、畸变率小等优点;有源频率漂移法能有效检测出孤岛效应,并及时做出孤岛保护动作,具有高的安全性和可靠性。建模仿真为开发高性能试验样机提供了很好的仿真基础。

## 【参考文献】

- [1] 杨金焕,于化丛,葛亮. 太阳能光伏发电应用技术[M]. 北京:电子工业出版社,2009.
- [2] 菲美琴,余世杰,苏建徽. 带有MPPT功能的光伏阵Matlab通用仿真模型[J]. 系统仿真学报,2005,17(5):1248-1251.
- [3] 李建,姚雪梅,夏东伟. 一种改进干扰观察法的仿真研究[J]. 杭州电子科技大学学报,2008,28(6):123-126.
- [4] HUNG G K, CHANG C C, CHEN C L. Analysis and implementation of a delay-compensated deadbeat current controller for solar inverters[C]. IEE Proceedings of Circuits, Devices and Systems, 2001, 148(5):279-286.
- [5] JOHN S, RUSSELL B, JERRY G, et al. Development and testing of an approach to anti-islanding in utility-interconnected photovoltaic systems[G]. 2000.
- [6] 张超. 光伏并网发电系统MPPT及孤岛检测新技术的研究[D]. 杭州:浙江大学,博士学位论文,2006.

收稿日期:2011-02-18

(上接第12页)

排压痕长度的情况下,优先选择方案6。目前,市场上销售的断路器中采用的方案主要有方案1、2、5。分别比较方案1、2、5与方案6,方案6比方案1操作力减小了26.7%;比方案2减小了23%;比方案5减小了14.8%。目前,市场上销售的智能断路器中,MTE、CW3型等高端产品均采用了该设计方法,达到了非常好的效果。

## 3 结 语

仿真结果表明,改变母排的倒角形式,合理设计倒角,对减小断路器本体进入抽屉座的阻力有很大的效果。除此之外,减小断路器本体进入抽屉座受力情况的方法有很多,如改变隔离触头的

形状、结构方式,改变抽屉传动方式和抽屉导轨设计结构等等。为了减小抽屉式断路器本体进入抽屉座的阻力,建议考虑综合上述因素进行结构优化设计,采用三维软件的仿真与试验相结合的方法,能设计出最优秀的产品。

## 【参考文献】

- [1] 陆俭国,何瑞华,陈德桂,等. 中国电气工程大典 第11卷 配电工程[M]. 北京:中国电力出版社,2009.
- [2] GB 14048.2-2008 低压开关设备和控制设备 第2部分 断路器[S]. 2008.
- [3] 濮良贵,纪名刚. 机械设计[M]. 7版. 北京:高等教育出版社,2001.

收稿日期:2010-11-22

作者: [毛洪生](#), [毛行奎](#), [裴昌盛](#), [MAO Hongsheng](#), [MAO Xingkui](#), [PEI Changsheng](#)  
作者单位: [福州大学, 电气工程与自动化学院, 福建, 福州, 350108](#)  
刊名: [低压电器](#) [ISTIC](#) [PKU](#)  
英文刊名: [LOW VOLTAGE APPARATUS](#)  
年, 卷(期): 2011(6)  
被引用次数: 2次

参考文献(6条)

1. [杨金焕](#); [于化丛](#); [葛亮](#) [太阳能光伏发电应用技术](#) 2009  
2. [茆美琴](#); [余世杰](#); [苏建徽](#) [带有MPPT功能的光伏阵Matlab通用仿真模型](#) [期刊论文]-[系统仿真学报](#) 2005(05)  
3. [李建](#); [姚雪梅](#); [夏东伟](#) [一种改进干扰观察法的仿真研究](#) [期刊论文]-[杭州电子科技大学学报](#) 2008(06)  
4. [HUNG G K](#); [CHANG C C](#); [CHEN C L](#) [Analysis and implementation of a delay-compensated deadbeat current controller for solar inverters](#) [外文期刊] 2001(05)  
5. [JOHN S](#); [RUSSELL B](#); [JERRY G](#) [Development and testing of an approach to anti-islanding in utilityintereconnected photovohaic systems](#) 2000  
6. [张超](#) [光伏并网发电系统MPPT及孤岛检测新技术的研究](#) [学位论文] 2006

本文读者也读过(2条)

1. [吴振宇](#), [耿兴华](#), [冯林](#), [赵亮](#), [WU Zhen-yu](#), [GENG Xing-hua](#), [FENG Lin](#), [ZHAO Liang](#) [基于DSP的单相光伏并网逆变器的设计](#) [期刊论文]-[电力电子技术](#) 2011, 45(5)  
2. [蔡逢煌](#), [郑必伟](#), [王武](#), [CAI Feng-huang](#), [ZHENG Bi-wei](#), [WANG Wu](#) [单相光伏并网逆变器的两种控制算法比较](#) [期刊论文]-[电力电子技术](#) 2011, 45(4)

引证文献(2条)

1. [张久亮](#), [郭前岗](#), [周西峰](#) [光伏并网逆变器准比例谐振控制仿真研究](#) [期刊论文]-[电测与仪表](#) 2013(2)  
2. [张慧慧](#), [朱晓荣](#) [光伏并网系统的建模与控制研究](#) [期刊论文]-[陕西电力](#) 2013(5)

引用本文格式: [毛洪生](#), [毛行奎](#), [裴昌盛](#), [MAO Hongsheng](#), [MAO Xingkui](#), [PEI Changsheng](#) [基于Simulink的单相光伏并网逆变器仿真研究](#) [期刊论文]-[低压电器](#) 2011(6)