

The Research of AC Solid State Circuit Breaker Applied to Distribution Grids

Xinrong Xiao¹, Shaofeng Huang¹, Cheng Kang², Yangjingyi Luo¹

¹School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing

²Beijing Sifang Automation Co., Ltd., Beijing

Email: 18811317751@139.com, huangsf@sf-auto.com

Received: Jul. 29th, 2018; accepted: Aug. 14th, 2018; published: Aug. 23rd, 2018

Abstract

With the intelligent development of the distribution grids, the requirements for the rapid retreat of the control circuit breaker are getting higher and higher. Therefore a solid state circuit breaker based on the IGBT is proposed. It can fast break the AC circuits of the distribution grids without arc and has certain fault self-checking function and overcurrent protection, which overcomes the defect of slow breaking speed of mechanical circuit breaker. This paper introduces the structure of solid state circuit breaker and the functions of the main modules, and describes the breaking process and principle of the circuit breaker. Then an improved RCD circuit is designed for the voltage unbalancing problem of series connected IGBTs. The important parameters of the solid state circuit breaker are deduced. Finally, a solid state circuit breaker with 16.3 kV/347 MVA is developed for simulation test to verify its feasibility in OrCAD Capture 16.3 Pspice.

Keywords

SSCB, AC Distribution Grids, IGBT, Series Voltage Balancing

应用于配电网系统的固态交流断路器研究

肖欣荣¹, 黄少锋¹, 康成², 罗阳静宜¹

¹华北电力大学电气与电子工程学院, 北京

²北京四方继保自动化股份有限公司, 北京

Email: 18811317751@139.com, huangsf@sf-auto.com

收稿日期: 2018年7月29日; 录用日期: 2018年8月14日; 发布日期: 2018年8月23日

摘要

随着配电网系统的智能化发展, 对控制断路器快速投退的要求越来越高, 为此设计了一种基于绝缘栅双

极型晶体管(Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT)的固态断路器(Solid State Circuit Breaker, SSCB),可以无弧、快速地开断交流配电网电路,并且具备一定的故障自检功能和过流保护能力,克服了机械断路器开断速度慢的缺点。本文介绍了固态断路器结构和主要模块的功能,并且描述了断路器的开断过程及原理。针对串联IGBT均压问题设计了改进型RCD电路,推导了串联均压电路和断路器的主要参数。在OrCAD Capture 16.3 Pspice平台搭建了一个16.3 kV/347 MVA的固态断路器并仿真验证了可行性。

关键词

固态断路器, 交流配电网, IGBT, 串联均压

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着新能源技术的发展,风电、太阳能分布式电源和大量的电力电子元件接入交流配电网[1] [2] [3] [4],为了线路发生短路故障后能及时、快速地切除故障线路,保护电网中的电力电子设备,现在亟需研究一种能够快速、灵活和可靠开断的断路器。

近年来功率半导体器件及其控制技术的进步促进了电力电子技术在电力系统中的广泛应用,其中,基于电力电子元件的固态断路器和混合式断路器的研究受到越来越多的重视。文献[5]设计了一种基于两条IGBT电路反串联组成的固态交流断路器,可以无弧、快速地开断交流电路,但是当电流正、反向流通时总有一条支路闲置无电流,导致元件的利用率低;文献[6]提出了一种可以重合闸和重分闸的新型拓扑结构的固态交流断路器,断路器使用半控型器件功率晶闸管(SCR)作为开断元件,所以电流必须过零才能关断,开断速度较慢且不够灵活;文献[7]设计了一种基于碳化硅型发射极关断晶闸管的固态直流断路器,优点是关断中等电压等级的大电流能力强,不足是驱动电路复杂且驱动功率大。

在此背景下,本文设计了一种适用于配电网的新型固态交流断路器,选用IGBT元件作为开断元件使断路器具有开断速度快、无弧和驱动结构简单等优势。这种拓扑结构对元件的利用率很高,可比文献[5]中的拓扑结构节省一半的IGBT元件,大大降低了成本。为了有效地消除断路器开断过程中造成的IGBT尖峰电压和串联均压不平衡问题,设计了改进型RCD均压电路。本文利用Pspice平台搭建了16.3 kV/347 MVA固态交流断路器模型并在配电网环境中进行开断仿真试验,试验结果证明了断路器开断速度快,并且过电压较小,开断效果良好。

2. 断路器结构与工作原理

目前有许多性能优良的电力电子器件,如SCR、GTO、GTR、IGBT、MOSFET、IGCT等[8],综合了可控性、功率损耗、开关特性和技术成熟程度等因素之后,本文将IGBT应用于固态断路器的设计中,IGBT具有开断速度快、热稳定性好、电压驱动功率小、控制电流能力强、通态损耗低和发展成熟等特点。

结合IGBT的特性与交流断路器的功能,设计了一种固态交流断路器,结构如图1所示。

断路器分为主电路和辅助模块两部分。主电路是由四个二极管模块、IGBT模块和金属氧化物压敏电阻(metal oxide varistors, MOV)缓冲支路按照图1方式连接而成,负责构成流经断路器的负荷电流通路。辅助模块包含测量模块、控制与驱动模块和冷却装置,负责控制驱动断路器动作和保护电力电子元件。

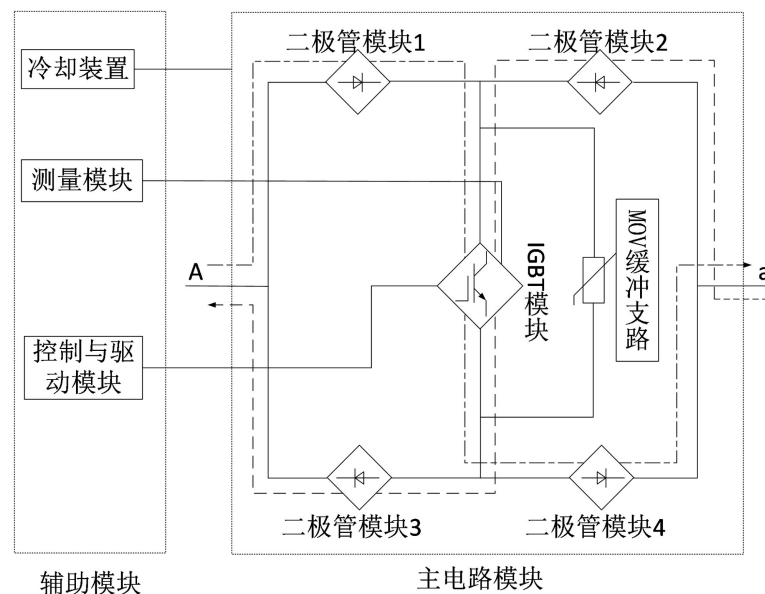


Figure 1. Circuit breaker module structure
图 1. 断路器结构模块

断路器工作在导通状态时, IGBT 模块处于导通状态, 正半周期交流电流沿图 1 中二极模块 1-IGBT 模块 - 二极模块 4 的点划线路径从 A 侧流向 a 侧, 负半周期交流电流沿图 1 中二极模块 2-IGBT 模块 - 二极模块 3 的虚线路径从 a 侧流向 A 侧; 断路器工作在关断状态时, IGBT 模块处于关断状态, 电流通路被关断, MOV 支路呈高电阻状态无电流流过; 当断路器收到分、合闸指令时, 控制与驱动模块产生偏置电压驱动 IGBT 断开或导通, 随着 IGBT 模块中的电流关断或导通, 断路器完成分、合闸, 全程不产生电弧。但是断路器分闸会引起电感电压突变, 断路器不仅需要承受电感感应出的尖峰电压, 还需要缓冲电感释放的能量, 所以在断路器内部增加了改进型 RCD 电路和 MOV 缓冲支路。

二极模块和 IGBT 模块采取多个元件串联和并联的方式组成, 可以大幅提高断路器的耐压等级和额定电流, 但是串联 IGBT 的均压问题直接影响到断路器的性能。为此特别设计了改进型 RCD 均压电路, 既能发挥传统 RCD 电路动态均压作用, 也能实现静态均压效果, 示意图如图 2 所示。断路器关断瞬间 IGBT 两端会有尖峰电压, 由 C、D 组成的并联电路可以吸收电感释放的能量从而抑制尖峰电压的产生, 促进动态过程中各 IGBT 的均压平衡。除了关断时串联 IGBT 的动态不均压, 在关断后也有可能因为运行特性的差异导致静态串联不均压, 不利于断路器的持久可靠运行, 所以在 IGBT 两端并联了静态均压电阻 R_t 。晶闸管 Q 平时是关断状态。C-D 电路和静态电压电阻电路工作时间不同, 是相对独立的两条支路。

IGBT 模块两端并联的 MOV 与避雷器特性相似, MOV 两端电压低于压敏电压时呈现高电阻状态, 超过后电阻急剧变小同时将电压钳位在额定值, 因此将 MOV 的压敏电压值设置为 IGBT 的额定电压以保护 IGBT。断路器关断后, 电流从 IGBT 转移到缓冲电容 C 上, 当缓冲电容 C 两端电压达到 MOV 压敏电压时, MOV 呈现低电阻状态, 故障电流从 C 转移到 MOV, 通过 MOV 支路消耗电感或者雷电释放的冲击能量。图 1 中的 MOV 支路是一个示意图, 实际电路中每个 IGBT 两端均并联一个 MOV 子模块, 子模块串联组成 MOV 缓冲支路。

固态断路器分、合闸时所有 IGBT 元件的断开或导通具有同步性, 控制与驱动模块的输出端与 IGBT 的栅极相连接, 发送统一的驱动信号控制 IGBT 同时通断。测量模块包含电流互感器和测量仪器, 实时监测每条 IGBT 支路的电流, 发现过流则向控制与驱动模块发送警告信号并采取过流保护措施。由于电力电子元件开关损耗和通态损耗会产热, 过热不仅会影响元件的工作特性, 严重时还会导致元件烧毁,

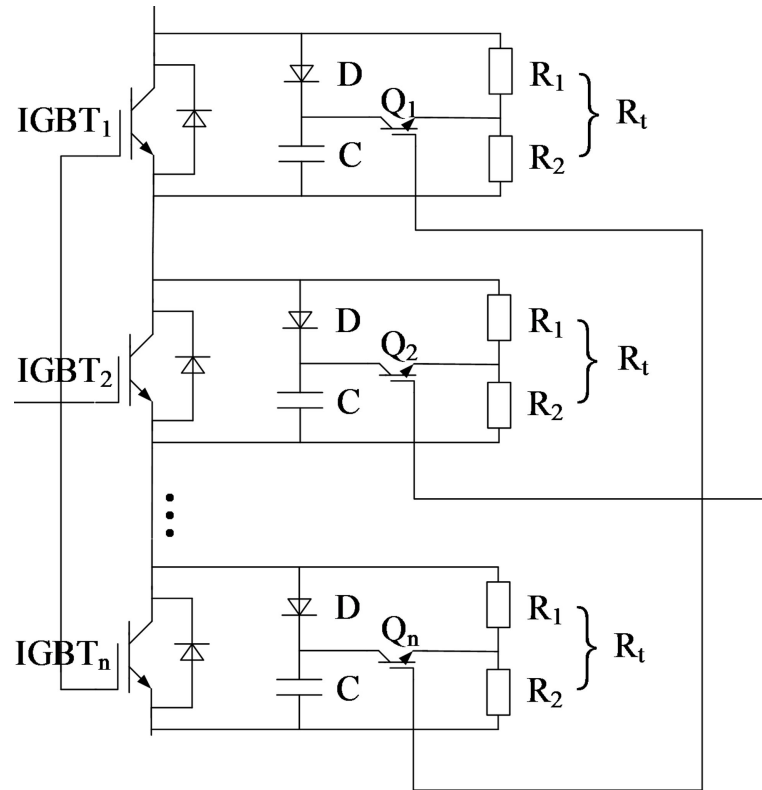


Figure 2. Voltage balancing circuit of series connected IGBTs
图 2. 串联 IGBT 的均压电路

所以可安装冷却装置进行散热，一般采用水冷散热，成本低且效果好。

3. 断路器参数设计

针对配电网的运行要求，根据本文断路器的结构特点对固体断路器的主要参数进行具体的设计，确定二极管模块和 IGBT 模块所需的元件及串并联数量，计算均压电路中电容和电阻的参数，设定缓冲支路 MOV 的压敏电压 U_{NMOV} 。

3.1. IGBT 和二极管的选取

本文选用了 RM500HA-24 (2H)型整流二极管和 CM300DY-24H 型 IGBT 作为二极管模块和 IGBT 模块的构成元件。RM500HA-24 (2H)型整流二极管主要参数为： $I_{\text{F(AV)}} = 500 \text{ A}$ ， $V_{\text{RRM}} = 1600 \text{ V}$ 。CM300DY-24H 型 IGBT 的主要参数为： $I_{\text{C}} = 300 \text{ A}$ ， $I_{\text{CM}} = 600 \text{ A}$ ， $V_{\text{CE}} = 1200 \text{ V}$ 。其中， I_{C} 是 IGBT 集电极额定直流电流； I_{CM} 是最大集电极电流； V_{CE} 是 IGBT 最大承受电压； V_{RRM} 是二极管反向重复峰值电压； $I_{\text{F(AV)}}$ 是二极管正向平均电流。

首先确定断路器的额定电压，计算单条支路上元件的串联数量。断路器承受的单相电压峰值 $U_{\phi\text{m}} = \sqrt{2} * U_{\text{N}} / \sqrt{3}$ 。断路器是由电力电子元件组成的，参考文献[9] [10]的整定标准，电力电子元件的额定电压需留出 2~3 倍安全裕量，额定电流留出 1.5~2 倍安全裕量，故断路器的额定电压为：

$$U_{\text{e}} = (2 \sim 3) * U_{\phi\text{m}} = (2 \sim 3) * \frac{\sqrt{2} * U_{\text{N}}}{\sqrt{3}} \quad (1)$$

式中， U_{e} 是断路器额定电压； $U_{\phi\text{m}}$ 是单相电压峰值； U_{N} 是配电网线电压。

二极管的串联数 n_1 可由下式求出:

$$n_1 = \left\lceil \frac{U_c}{V_{RRM}} \right\rceil \quad (2)$$

IGBT 的串联数 n_2 可由下式求出:

$$n_2 = \left\lceil \frac{U_c}{V_{CE}} \right\rceil \quad (3)$$

式(2)、(3)中, n_1 是串联二极管的数量; n_2 是串联 IGBT 的数量; $\lceil \rceil$ 是向上取整运算符号。

然后计算并联支路数, 因为二极管的额定电流是电流平均值, 所以需将电流有效值转化为平均值。由短路电流有效值可以得到流经断路器的峰值电流 $I_m = \sqrt{2} * I_f$, 每个二极管模块只流过半个周期的电流, 电流平均值和峰值的关系为:

$$I_{dd} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\frac{T}{2}} (I_m \sin \omega t) d(\omega t) = \frac{I_m}{\pi} \quad (4)$$

式中, I_{dd} 是流过二极管模块的电流平均值; I_m 是流经断路器的电流峰值。

二极管模块的并联支路数 n_3 可由下式求出:

$$n_3 = \left\lceil (1.5 \sim 2) * \frac{I_{dd}}{I_{F(AV)}} \right\rceil \quad (5)$$

IGBT 模块最大集电极电流必须不小于短路电流峰值, 所以 IGBT 模块额定电流最小应满足为:

$$I_{dg} = I_m \quad (6)$$

式中, I_{dg} 是流过 IGBT 模块的额定电流峰值。

IGBT 模块的并联支路数 n_4 可由下式求出:

$$n_4 = \left\lceil (1.5 \sim 2) * \frac{I_{dg}}{I_{CM}} \right\rceil \quad (7)$$

将配电网电压 $U_N = 10$ kV、短路电流 $I_f = 20$ kA 代入式(1)~(7)中可得 $n_1 = 11 \sim 16$, $n_2 = 14 \sim 21$, $n_3 = 27 \sim 36$, $n_4 = 71 \sim 95$, 所以二极管模块的并联支路取 27 条, 每条支路串联 11 个二极管; IGBT 模块的并联支路取 71 条, 每条支路串联 14 个 IGBT。此时断路器的额定电压为 $U_c = 16.3$ kV, 额定电流为 $I_c = 21.3$ kA, 最大开断电流 $I_{emax} = 42.6$ kA。

3.2. 均压电路的参数设计

IGBT 性能虽然已经取得了很大的进步, 但是目前商用的 IGBT 仍不能满足电力系统的耐压要求。IGBT 的串并联是提高模块容量最简单有效的方法, 然而 IGBT 的串并联问题十分复杂, 分压分流的影响因素众多, 如 IGBT 自身参数不一致、外围电路参数不一致、栅极驱动电路信号不一致以及电路的布局和 IGBT 的工作温度等。为了解决串并联 IGBT 均压和均流问题, 国内外已有大量相关研究 [11]~[16]。

本文在此基础上设计了改进型 RCD 电路, 它弥补了传统 RCD 电路的不足, 不仅可以同时保障动、静态过程的电压平衡, 还不会造成集电极电流上升。改进型 RCD 电路工作原理如图 3 所示, 电路根据功能划分为动态和静态均压电路两部分。为了尽可能地减小串并联均压、均流不平衡, 断路器最好使用同一批次参数相同的电子元件, 采用元件对称布局以及增加散热装置。

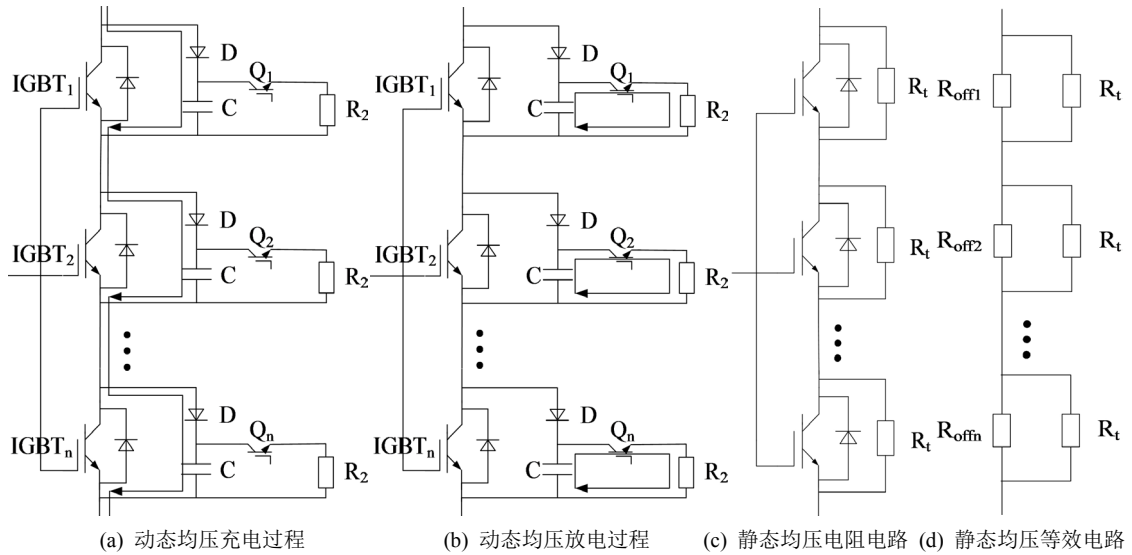


Figure 3. Principle of improved RCD circuit
图 3. 改进型 RCD 电路工作原理

3.2.1. 动态均压电容和电阻选取

RCD 电路中动态均压电路部分如图 3(a)、图 3(b)所示，由二极管、电容、晶闸管和电阻组成，关断时刻由 C-D 电路对电容充电，起关断缓冲作用，电流流向如图 3(a)中的箭头方向；IGBT 导通完毕后，晶闸管导通一段时间，形成 C-Q-R 环形通路对电容放电，为下一次关断缓冲做准备。

关断时刻的尖峰电压主要由断路器中的杂散电感产生，缓冲电容吸收电感释放的能量以减小尖峰电压，从而实现动态过程中的均压平衡。缓冲电容吸收的能量应和电感中释放的能量平衡。

$$\frac{1}{2} C * \Delta U^2 = \frac{1}{2} L_s * I^2 \tag{8}$$

由式(8)可得：

$$C = \frac{L_s * I^2}{\Delta U^2} \tag{9}$$

式中， L_s 是断路器中的杂散电感； I 为流经电感的电流； C 为 RCD 电路中的缓冲电容； ΔU 为电容两端产生的过电压。

Q 应在 IGBT 完全导通后开通，在下次关断前关断， Q 的导通时间根据实际情况而定，在此期间电容通过 C-Q-R 电路将能量释放完毕。

$$\tau = R_2 C \leq \tau_0 \tag{10}$$

所以 R_2 取值范围为：

$$R_2 \leq \frac{\tau_0}{C} \tag{11}$$

式中， τ 是 C-Q-R 电路的放电时间常数； τ_0 是 Q 的导通时间； R_2 是 C-Q-R 电路中的电阻。

吸收 C 释放的能量，所以 R_2 的功率应满足：

$$P \geq \frac{1}{2} C * \Delta U^2 * \frac{1}{\tau} = \frac{\Delta U^2}{2R_2} \tag{12}$$

3.2.2. 静态均压电阻选取

因为生产工艺和工作温度的差异, IGBT 实际运行时的自身参数会不一致, 直接影响到串联 IGBT 的分压不均, 此时可以将关断的 IGBT 等效成阻值不同的漏电阻。为了实现均压平衡, 在漏电阻两端并联一个静态均压电阻 R_t , 使每个漏电阻与 R_t 并联后的等效电阻基本相等, 示意图如图 3(c)、图 3(d)所示, 后者是前者的等效电路。

依照经验, 增加 R_t 后均压不平衡率在 5%以内可保证各元件均压平衡, 求出 R_t 的取值范围。定义均压不平衡率为串联 IGBT 中承受最高电压与最低电压之差和最高电压的比值。

$$\gamma = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{V_{\max}} \quad (13)$$

式中, γ 是均压不平衡率; V_{\max} 、 V_{\min} 分别是串联 IGBT 中两端电压最大、最小值。

假设 n 个串联 IGBT 中, IGBT1 承受的电压最大, IGBT2 承受的电压最小, 则并联静态均压电阻后均压不平衡率为:

$$\gamma = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{V_{\max}} = \frac{(R_{\text{off1}} // R_t) - (R_{\text{off2}} // R_t)}{(R_{\text{off1}} // R_t)} = \frac{\frac{R_{\text{off1}}}{R_t} - 1}{\frac{R_{\text{off1}}}{R_t} + \frac{R_{\text{off2}}}{R_t}} \quad (14)$$

根据 $\gamma \leq 5\%$ 可得静态均压电阻取值范围:

$$R_t \leq \frac{R_{\text{off1}}}{19 * \frac{R_{\text{off1}}}{R_{\text{off2}}} - 20} \quad (15)$$

式(14)、(15)中, R_t 是静态均压电阻; R_{off1} 是 IGBT1 的等效漏电阻; R_{off2} 是 IGBT2 的等效漏电阻。

通过产品参数可求出漏电阻:

$$R_{\text{off}} = \frac{V_{\text{ces}}}{I_{\text{ces}}} \quad (16)$$

式中, V_{ces} 是集电极 - 发射极阻断电压; I_{ces} 是集电极 - 发射极漏电流。

由式(8)~(16)求得均压电路主要参数, RCD 均压电路的参数 $\mu = 53 \text{ pF}$, $R_2 \leq 180 \Omega$, $P \geq 4 \text{ kW}$, 静态均压电阻 $R_t = 7 \text{ k}\Omega$ 。

RCD 均压电路可以有效地抑制动态过程中尖峰电压的产生, 但是电容充电完毕后电路处于开断状态, 不再发挥均压作用。静态均压电阻可以在后续的静态过程实现 IGBT 的均压平衡。所以将二者结合使用改善串联 IGBT 动、静态均压问题。

3.2.3. MOV 的选取

MOV 支路并联在 IGBT 两端, 当电压将要超过 IGBT 最大承受电压时, MOV 将电压钳制在安全电压以内, 从而保护 IGBT 不被击穿。所以 MOV 的压敏电压 U_{NMOV} 应与 IGBT 最大承受电压相等。

$$U_{\text{NMOV}} = V_{\text{CE}} \quad (17)$$

因为 $V_{\text{CE}} = 1200 \text{ V}$, 所以选取压敏电压为 1200 V 的 MOV 并联在 IGBT 两端。

4. 仿真试验

为了验证设计的固态断路器的开断能力和速度, 依照第 2 节断路器的元件选取和参数设计, 用 Pspice 软件搭建了一个 16.3 kV/347 MVA 的固态断路器模型, 并对短路电流为 20 kA 的 10 kV 交流配电网进行分、合闸。断路器两端电压和流经断路器电流的仿真波形如图 4(a)、图 4(b)所示。

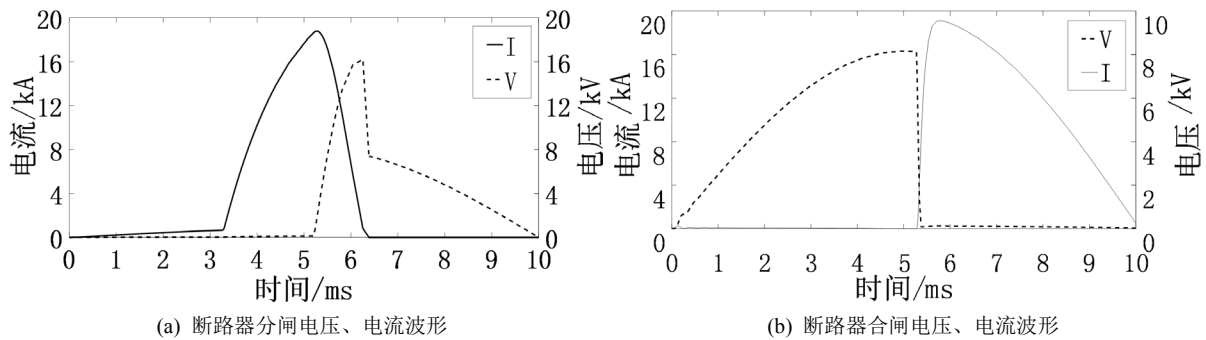


Figure 4. The simulation waveform of the circuit breaker closes and breaks circuit at 5 ms
图 4. 断路器在 5 ms 时刻分、合闸仿真波形

图 4(a)是断路器分闸过程两端电压和流经断路器的电流,从图中可知,配电网在 3.3 ms 时发生短路,随后短路电流激增至 20 kA。断路器在 5 ms 时刻发出分闸指令,经过 0.3 ms 延时开始动作,电流开始下降,6.4 ms 时刻电流降为 0,此时断路器完全断开,分闸过程历经 1.4 ms,断路器两端电压在分闸前有 121 V 的导通电压损耗,分闸过程产生了一个 16 kV 的尖峰电压,最后趋于稳定。图 4(b)是断路器合闸过程的电压、电流波形,从图易知,断路器在 5 ms 时刻发出合闸指令,5.3 ms 时断路器开始动作,5.4 ms 时电压降为 118 V(断路器通态压降),在 5.8 ms 时刻电流恢复到 19 kA,断路器完成合闸,共耗时 0.8 ms。

综上所述,断路器的分闸时间 1.4 ms,合闸时间 0.8 ms,分闸过程中冲击电压控制在 16 kV 以内,由于固态断路器内部的电力电子元件工作时存在饱和电压,导致断路器有一定的电压损耗,试验中断路器的通态电压损耗为 120 V 左右,电压损耗率为 1.5%,仍在可接受范围内。以 ZW32-12F 型机械断路器为例,分、合闸时间一般为 20~55 ms 和 25~60 ms,导通时的电压损耗在 2 V 以内,所以与机械断路器相比,固态断路器的电压损耗较高,但是开断速度大大提升且有效抑制过电压,分、合闸效果更好。

5. 结语

本文基于 IGBT 快速开断的特性设计了一种纯电力电子元件组成的断路器,大大提高了开断电流的速度。但是由于电力电子元件的脆弱性,对它的保护直接关系到断路器能否可靠持久地工作,所以安装了均压电路和吸收电路防止 IGBT 遭受过压损坏。在 Pspice 平台搭建了 16.3 kV/347 MVA 固态断路器模型,并且在 10 kV 等级的交流配电网电路中进行了仿真试验。试验结果表明该断路器能够在短时间内快速开断电路,而且增加的均压电路和吸收回路能够有效地吸收回路中出现的冲击使断路器稳定运行在安全区域。

参考文献

- [1] 沈鑫,曹敏. 分布式电源并网对于配电网的影响研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(S1): 346-351.
- [2] 谢秉鑫,王宗,范士林. 分布式电源对于配电网谐波特性的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(2): 116-119.
- [3] 刘爽,牟龙华,许旭锋,郭文明. 电力电子器件故障对微电网运行可靠性的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(24): 63-70.
- [4] 陈磊,刘永奇,戴远航,闵勇,张玮灵,侯凯元. 电力电子接口新能源并网的暂态电压稳定机理研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(9): 15-21.
- [5] Pusorn, W., Srisongkram, W., Subsingha, W., et al. (2007) Low Cost AC Solid State Circuit Breaker. *International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, Bangkok, 27-30 November 2007, 1724-1729. <https://doi.org/10.1109/PEDS.2007.4487941>
- [6] Kim, J.Y., Choi, S.S. and Kim, I.D. (2015) A Novel Reclosing and Rebreaking AC Thyristor Circuit Breaker. *2015 9th International Conference on Power Electronics and Ecce Asia*, Seoul, 1-5 June 2015, 2574-2581.

<https://doi.org/10.1109/ICPE.2015.7168137>

- [7] Zhang, L., Woodley, R., Song, X.Q., *et al.* (2018) High Current Medium Voltage Solid State Circuit Breaker Using Paralleled 15 kV SiC ETO. 2018 *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, San Antonio, 4-8 March 2018, 1706-1709. <https://doi.org/10.1109/APEC.2018.8341247>
- [8] 钱照明, 张军明, 盛况. 电力电子器件及其应用的现状和发展[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5149-5161.
- [9] 王兆安, 刘进军. 电力电子技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [10] 徐国政, 张节容, 钱家骊, 等. 高压断路器原理和应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [11] Chen, J.F., Lin, J.N. and Ai, T.H. (1996) The Techniques of the Serial and Paralleled IGBTs. *IEEE IECON, International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation*, Taipei, 9 August 1996, 999-1004.
- [12] Busatto, G., Cascone, B. and Fratelli, L. (1998) Series Connection of IGBTs in Hard-Switching Applications. *Conference Record of 1998 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Third IAS Annual Meeting*, St. Louis, 12-15 October 1998, 825-830.
- [13] 梅桂芳, 安昱, 张建. 基于门极阻容补偿网络的 IGBT 串联均压方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(4): 35-47.
- [14] 乔尔敏, 温旭辉, 郭新. 基于 IGBT 并联技术的大功率智能模块研制[J]. 电工技术学报, 2006, 21(10): 90-93.
- [15] Hofer, P., Karrer, N. and Gerster, C. (2002) Paralleling Intelligent IGBT Power Modules with Active Gate-Controlled Current Balancing. *PESC Record. 27th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Baveno, 23-27 June 1996, 1312-1316.
- [16] Selgi, L.M., Sorrentino, G., Fragapane, L., *et al.* (2008) Preliminary Experimental Evaluation on PT-IGBT in Parallel Connection. *European Conference on Power Electronics and Applications*, Aalborg, 2-5 September 2007, 1-8.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2161-8763, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: sg@hanspub.org