低压直流固态断路器分断特性优化方法研究

王海燕[1],吴自然[1,2],钱祺[1],夏初阳[3],许海波[1,2],林振权[2]
(1.温州大学 浙江省低压电器工程技术研究中心,浙江 温州 325035;
2.温州大学乐清工业研究院,浙江 温州 325699;
3.新驰电气集团有限公司,浙江 温州 325604)

摘要:为提高在直流系统发生短路故障时固态断路器(SSCB)的分断能力,提出一种考虑分断特性的低压直流固态断路器参数多目标优化方法。首先对短路故障时SSCB的分断流程进行详细分析,通过理论与仿真确定了限流电感LB和金属氧化物压敏电阻的限电压能力系数γ对分断特性的影响。以分断特性为基础,建立了SSCB的分断冲击性能指标、分断时间指标、能量吸收指标三个优化目标函数,通过多目标粒子群算法对目标函数进行优化,采用结合决策者偏好的逼近于理想解的排序方法对优化方案进行决策。优化结果表明,在各种决策者偏好下的优化方案,其优化设计后的元件参数L_B和γ均能显著提高SSCB的分断性能。

关键词:低压直流固态断路器;拓扑结构;短路故障;分断特性;多目标优化
中图分类号:TM561 **文献标识码**:A **DOI**:10.19457/j.1001-2095.dqcd24667

Research on Breaking Characteristic Optimization for Low-voltage DC Solid-state Circuit Breaker

WANG Haiyan[1],WU Ziran[1,2],QIAN Qi[1],XIA Chuyang[3],XU Haibo[1,2],LIN Zhenquan[2]
(1.*Low Voltage Apparatus Technology Research Center of Zhejiang*,*Wenzhou University*,*Wenzhou* 325035,*Zhejiang*,*China*;2.*Technology Institute of Wenzhou University in Yueqing*,*Wenzhou* 325699,*Zhejiang*,*China*;3.*SUNTREE Electric Group Co.*,*Ltd.*,*Wenzhou* 325604,*Zhejiang*,*China*)

Abstract: In order to improve the short-circuit breaking capacity of solid-state circuit breaker (SSCB) in DC system, a multi-objective optimization method that explores component parameters to achieve optimal breaking characteristics was proposed. A detailed analysis of the breaking process of the SSCB during a short-circuit fault was performed, and the influence of the current limiting inductor LB and the voltage limiting capacity factor γ of the metal oxide varistor (MOV) on the breaking characteristics was investigated by theoretical analysis and simulation. Based on the breaking characteristics, three optimization objective functions of breaking impact performance, breaking time and energy absorption were established. The objective functions were optimized by the multi-objective particle swarm algorithm, and a method which combines technique for order preference by similarity to ideal solution and decision maker preferences, was used to make decisions. The results show that under different decision maker preferences, the component parameters L_B and γ after the optimization can significantly improve the breaking performance of the SSCB.

Key words: low-voltage DC solid-state circuit breaker; topological structure; short-circuit fault; breaking characteristics; multi-objective optimization

随着功率半导体器件以及新能源的快速发展,直流电网成为未来电网的重要发展方向[1]。直流断路器广泛应用于直流电网安全运行和系统保护,其能在短时间内切除短路故障电流和抑制过电压,对直流电网的发展具有重大意义[2]。传统的机械式直流断路器存在分断速度慢、触头易损坏等缺点[3],难以满足直流配电系统快速可靠保护的要求[4],而全固态直流断路器因其分断速度快、可靠性强[5]等优点,在光伏发电系统、轨道交通牵引供电系统、直流配电领域、船舶领域、

基金项目:浙江省教育厅一般科研项目(Y202044245);温州市工业科技项目(ZG2020049,ZG2021026)
作者简介:王海燕(1998—),女,硕士研究生,主要研究方向为固态断路器的优化设计,Email:997402977@qq.com
通讯作者:吴自然(1984—),男,博士,副研究员,主要研究方向为电器智能化、智能制造理论和技术,Email:naturex@wzu.edu.cn

航空航天等领域得到了广泛应用[6]。

直流固态断路器由功率半导体器件构成，断路器参数的设计会直接影响其分断性能及设备安全性。针对这一问题，需对固态断路器的内部参数进行合理设计，使其同时满足固态断路器各个分断性能指标，并保障设备安全可靠运行。文献[7]设计了一种改进RC缓冲器和金属氧化物压敏电阻（mental oxide varistor，MOV）并联的固态断路器拓扑方案，就RC参数对分断性能的影响进行了理论性的分析。文献[8]设计了一种限流式固态断路器，从理论上分析了限流电感对限制短路电流幅值的影响并在Saber仿真中验证了电感参数对分断性能的影响。文献[9]分析了能量吸收回路中杂散电感对直流断路器关断性能的影响并建立了等效电路模型。上述方案均未对断路器内部参数的选取提供具体的设计方案。整体而言，现有的文献大多是对断路器参数对分断性能的影响过程进行分析，并未对断路器的元件参数进行具体优化。故寻找最优的元件参数，使固态断路器的分断性能达到整体性最优，是本文需要解决的关键问题。

针对上述关键问题，提出一种考虑分断特性的低压直流固态断路器（solid-state circuit breaker，SSCB）的多目标优化方法。首先，通过理论和仿真试验分析了固态直流断路器元件参数限流电感L_B和MOV限电压能力系数γ对分断特性的影响。在此基础上，以L_B和γ为决策变量，采用粒子群优化算法对SSCB分断冲击性能指标、分断时间指标及能量吸收指标进行多目标优化求解，得到多组优化方案。对优化方案采用结合决策者偏好的逼近于理想解的排序方法（technique for order preference by similarity to ideal solution，TOPSIS）进行决策，获得不同偏好下的最优方案，使SSCB的分断性能得到显著提升。最后搭建实验室样机，验证了低压直流固态断路器原理设计上的可行性。

1　SSCB原理分析

1.1　拓扑结构分析

图1为双桥式低压直流固态断路器结构，断路器采用绝缘栅双极性晶体管（insulated gate bipolar transistor，IGBT）作为开关器件，其主拓扑由上、下两个桥式结构组成，具有双向导通能力。SSCB由长期通流支路①、主断流支路②、能量吸收支路③和限流模块④组成。长期通流支路由IGBT单元串联构成，承担线路正常工作时的额定电流。主断流支路由IGBT单元串并联组成，可承受并关断短路故障电流。能量吸收支路由MOV构成，限制SSCB分断所产生的过电压并且吸收能量，减少断路器承受的电压应力，保护电力电子器件。限流模块可有效地抑制短路故障时短路电流的上升率，减少固态开关承受的电流应力，防止电力电子器件的损坏或击穿，降低对故障判断灵敏性的要求和对开关速动性的要求。

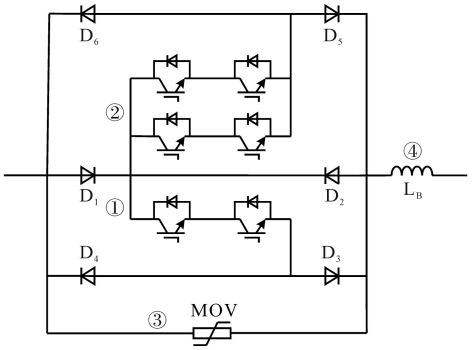


图1　双桥式低压直流固态断路器结构

Fig.1　Topology of the double-bridge low-voltage DC SSCB

1.2　工作原理分析

基于上述双桥式固态低压直流断路器拓扑结构，对其分断过程工作原理进行分析。以SSCB右端发生短路故障为例，短路故障电流的时序图如图2所示。

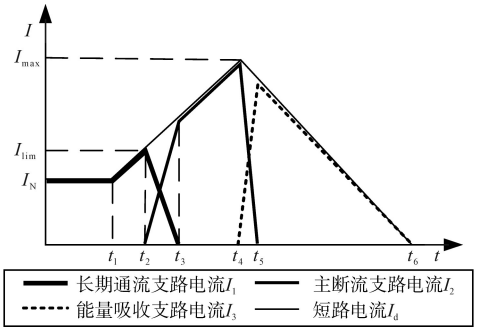


图2　故障发生时直流固态断路器时序图

Fig.2　Sequence diagram of the DC SSDB when a fault occurs

分断过程如下：

1）阶段1（0—t_1）：系统正常工作，额定电流I_N从长期通流支路中串联的IGBT导通。该阶段电流流向示意如图3a所示。

2）阶段2（t_1—t_2）：t_1时刻发生短路故障，短路电流I_d迅速上升，由于该阶段I_d未超过长期通流支路分断电流极限值I_{lim}，因此I_d继续流经长期通流支路，此时电流流向与阶段1一致。

3）阶段3（t_2—t_3）：t_2时刻I_d达到I_{lim}，此时关断长期通流支路串联的IGBT，同时导通主断流支路

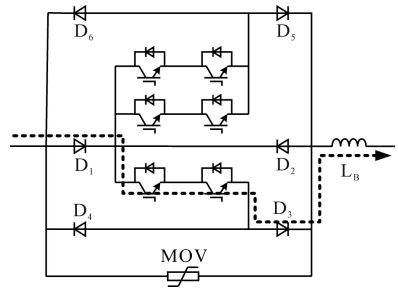
的IGBT，长期通流支路电流I_1逐渐减小，主断流支路电流I_2逐渐增大，I_d逐渐转移至主断流支路，在t_3时刻长期通流支路的I_1衰减至零。

4）阶段4（t_3—t_4）：t_3时刻I_d全部转移至主断流支路并稳定上升，在该阶段的电流流向示意如图3b所示。

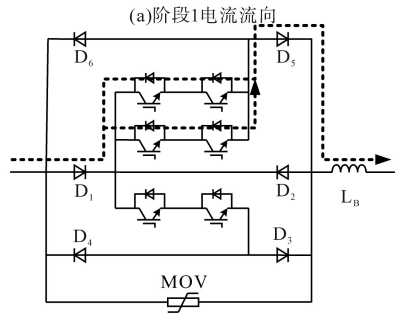
5）阶段5（t_4—t_5）：t_4时刻I_d达到主断流支路分断电流最大值I_{max}，此时关断主断流支路串并联的IGBT，I_d逐渐转移至能量吸收支路，在t_5时刻主断流支路的I_2衰减至零。

6）阶段6（t_5—t_6）：t_5时刻I_d全部转移到能量吸收支路，此时MOV开始吸收能量，I_d逐渐衰减，在t_6时刻I_d衰减为零，完成了短路故障分断，该阶段的电流流向示意如图3c所示。

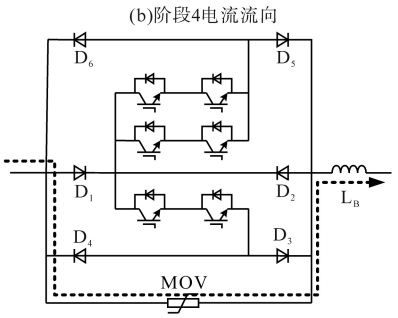
图2中，t_1—t_4称为短路电流上升阶段，此时短路电流I_d不断增加，t_4—t_6称为短路电流下降阶段，此时短路电流I_d不断减少。



(a)阶段1电流流向



(b)阶段4电流流向



(c)阶段6电流流向

图3　电流流向示意图

Fig.3　Current flow direction

2　分断特性分析

基于第1节所述的双桥式低压直流固态断路器拓扑结构，本节对短路电流上升阶段和下降阶段进行分析，建立短路电流上升率k_1、分断电压上升率k_2、分断时间Δt和MOV支路吸收能量E_{MOV}分断特性参数。在此基础上，分析分断特性参数与固态断路器元件参数限流电感L_B和MOV限电压能力系数γ的关系。

2.1　短路电流上升阶段分断特性

为简化分析，直流网络采用一阶等效电路模型[10]，如图4所示，由电源电压U_{dc}、线路电阻R_{dc}、线路电抗L_{dc}、限流电感L_B、负载电阻R_L和开关K组成。K断开表示直流网络正常运行，K闭合表示在直流网络负载端发生短路故障。

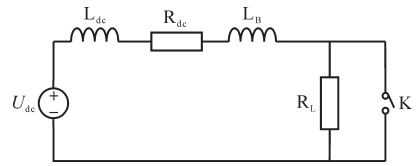


图4　电流上升阶段等效电路模型

Fig.4　Equivalent circuit model of current rising stage

短路电流上升阶段的短路电流$i_{f1}(t)$为

$$i_{f1}(t)=U_{dc}\left[\frac{1}{R_{dc}}+\left(\frac{1}{R_{dc}+R_L}-\frac{1}{R_{dc}}\right)e^{-\frac{t}{\tau}}\right] \quad (1)$$

其中

$$\tau=\frac{L_B+L_{dc}}{R_{dc}}$$

对式（1）进行化简可以得到短路电流上升阶段时间Δt_1：

$$\Delta t_1=\frac{L_B+L_{dc}}{R_{dc}}\ln\frac{R_L U_{dc}}{(R_{dc}+R_L)(U_{dc}-I_{max}R_{dc})} \quad (2)$$

式中：I_{max}为主断流支路最大分断电流。

对式（1）进行求导可得到短路电流上升率k_1：

$$k_1=\frac{di_{f1}(t)}{dt}=\frac{U_{dc}}{L_B+L_{dc}}\cdot\frac{R_L}{R_L+R_{dc}}\cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (3)$$

当直流系统出现短路故障时，短路电流迅速增加，会产生极大的电流上升率，对IGBT造成击穿损坏，减少器件的使用寿命。为了避免这种现象，需要对短路电流上升率k_1进行限制，使其越小越好[11]。

从上述公式可以得到电流上升阶段的分断特性，由式（2）可知Δt_1与SSCB中的限流电感L_B成正比；由式（3）可知短路电流的上升率k_1与限流电感L_B成反比。

2.2　短路电流下降阶段分断特性

当固态断路器主断流支路串并联IGBT单元关断时（t_4—t_5），产生分断过电压，当分断过电压达到MOV动作电压后，MOV触发，由高阻态变为

低阻态，短路电流转移至能量吸收支路。此时固态断路器的端电压等于MOV两端的限制电压U_{MOV}。同时短路故障电流在MOV中逐渐吸收，短路电流下降，MOV吸收系统能量。当短路电流下降为零时，分断过程完成。

MOV吸收短路电流时，电流下降阶段的短路电流$i_{f2}(t)$为

$$i_{f2}(t)=\frac{U_{dc}-U_{MOV}}{R_{dc}}+(I_{max}-\frac{U_{dc}-U_{MOV}}{R_{dc}})e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (4)$$

SSCB分断过程产生的分断电压由MOV进行限制，MOV的限制电压U_{MOV}的表达式为

$$U_{MOV}=\gamma U_{rated}=\gamma U_{dc} \quad (5)$$

式中：U_{rated}为固态断路器的额定工作电压，由直流系统额定电压U_{dc}决定。

对式(4)进行化简分析可以得到短路电流下降阶段时间Δt_2：

$$\Delta t_2=\frac{L_B+L_{dc}}{R_{dc}}\left[-\ln\frac{(1-\gamma)U_{dc}/R_{dc}}{(1-\gamma)U_{dc}/R_{dc}-I_{max}}\right] \quad (6)$$

SSCB两端分断电压的上升率k_2如下式所示：

$$k_2=\frac{du}{dt}=\frac{U_{MOV}}{t_4-t_5}=\frac{\gamma U_{rated}}{t_4-t_5} \quad (7)$$

当k_2过大时，IGBT两端会承受很大的电压冲击而损坏器件，为了减少冲击，提高装置的可靠性，需对分断电压上升率k_2进行限制，在工程实际允许的范围内，使其越小越好。

在短路电流下降的过程中MOV进行能量的吸收，MOV吸收的能量一部分来源于直流电源，另一部分来源于线路电感以及SSCB的限流电感，其中吸收自直流电源的能量E_{dc}为

$$E_{dc}=\int_{t_4}^{t_6}u_{dc}\cdot i\mathrm{d}t=\frac{(L_B+L_{dc})I_{max}^2}{2(\gamma-1)} \quad (8)$$

吸收自线路电感及固态断路器限流电感的能量E_L为

$$E_L=\int_{t_4}^{t_6}u_L\cdot i\mathrm{d}t=(L_B+L_{dc})I_{max}^2/2 \quad (9)$$

式中：u_L为电感两端的电压。

故MOV吸收的能量E_{MOV}为

$$E_{MOV}=E_{dc}+E_L=\frac{\gamma(L_B+L_{dc})I_{max}^2}{2(\gamma-1)} \quad (10)$$

为降低固态断路器分断过程中产生的能量损耗，提高MOV元件的使用寿命，分断过程中MOV吸收的能量E_{MOV}应当越小越好。为实现对线路中短路故障进行分断，短路电流的分断时间$\Delta t=(\Delta t_1+\Delta t_2)$应该越小越好。

对上述公式分析可以得到电流下降阶段的分断特性，由式(6)可知Δt_2与SSCB中的限流电感L_B成正比，与γ成反比；由式(7)可知电压上升率k_2与γ成正比；由式(10)可知E_{MOV}与L_B成正比，与γ成反比。

3　分断特性验证

基于上文所提的双桥式低压直流固态断路器短路电流的分断特性，本节搭建仿真电路，对该分断特性进行仿真验证，确立限流电感L_B和限电压能力系数γ对分断特性参数（短路电流上升率k_1、分断电压上升率k_2、分断时间Δt和MOV支路吸收能量E_{MOV}）的影响。

3.1　仿真模型构建

在低压直流领域，集中式光伏发电系统、电动汽车充电桩住宅系统等不同领域的供电电压均采用1.0~1.5 kV，1.5 kV低压固态断路器的研究成为未来的发展趋势。基于电动汽车充电桩住宅市场领域，本文采用1.5 kV作为直流系统的额定电压。常见电动汽车充电桩的额定输出电流为80~120 A，故选取固态断路器的额定电流为100 A。根据用电的实际情况，模型中的导线选取单回路铜芯导线，其截面积s为25 mm^2，不考虑线路之间的耦合及其他因素的影响，通过下两式计算出线路电阻R_{dc}和线路电感L_{dc}：

$$R_{dc}=\rho l/s \quad (11)$$

$$L_{dc}=\mu_0 l/(2\pi)[\ln(2l/r)-0.75] \quad (12)$$

式中：l为导线长度，取50 m；r为导线半径，取2.82 mm；ρ为铜电阻率，取0.017 5 Ω·mm^2/m；μ_0为真空电导率，取$4\pi\times10^{-7}$ H/m[12]。

由上述计算可得，为满足仿真过程中SSCB的额定电流I_N=100 A，电路负载R_L取14.965 Ω，具体仿真参数值如下：电源电压U_{dc}=1.5 kV，线路电阻R_{dc}=35 mΩ，线路电感L_{dc}=28 μH，断路器额定电流I_N=0.1 kA，负载电阻R_L=14.965 Ω，长期通流支路最大分断电流I_{lim}=0.5 kA，主断流支路最大分断电流I_{max}=1.0 kA，IGBT分断时间1.0 μs。

为了对固态断路器的分断性能进行验证，在PSCAD/EMTDC电磁仿真环境中搭建1.5 kV的仿真电路，进行仿真试验。故障模块Fault在0.2 s时发送短路信号，模拟短路故障发生。主电路采用双桥式结构，由二极管、IGBT器件及电感元件构成，控制电路可通过给IGBT发送导通、关断信号g_1和g_2来实现故障电流的转移及清除，图5为低压直流固态断路器的仿真模型。

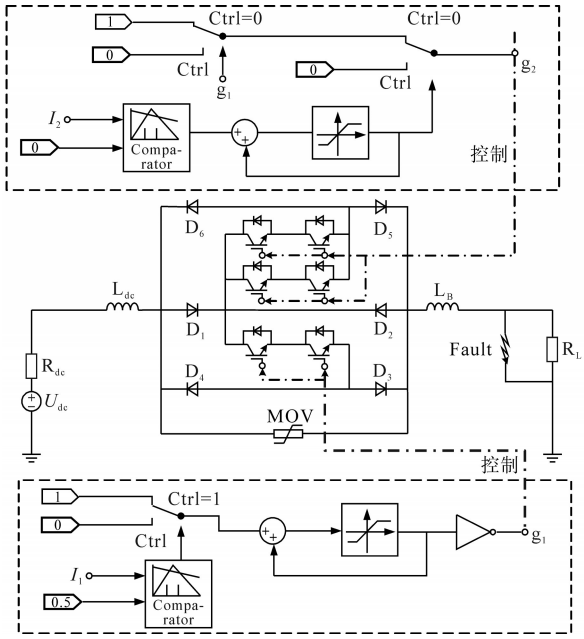


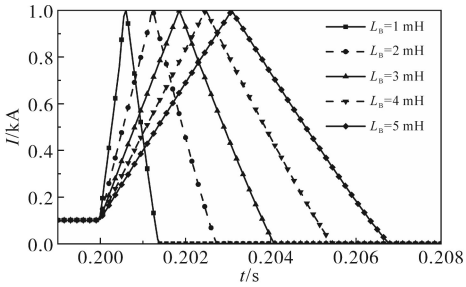
图5　低压直流固态断路器仿真模型

Fig.5　Simulation model of the low-voltage DC SSCB

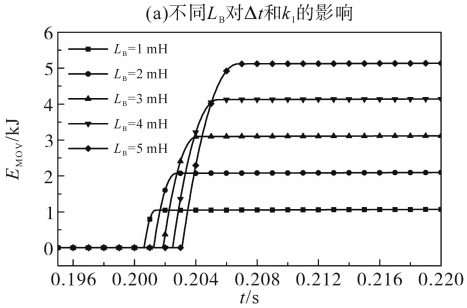
3.2　断路器元件参数对分断特性参数的影响

3.2.1　限流电感L_B对分断特性参数影响

控制MOV限电压能力系数γ为1.5,分别在限流电感L_B为1～5 mH时进行仿真试验,分析不同L_B对分断特性参数的影响,仿真结果如图6所示。



(a)不同L_B对Δt和k_1的影响



(b)不同L_B对E_{MOV}的影响

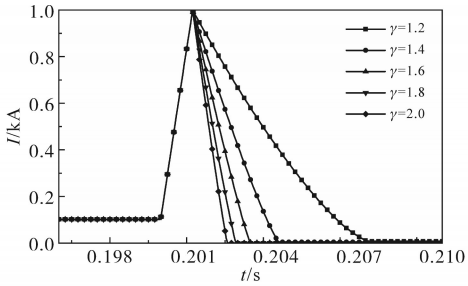
图6　不同L_B对k_1,Δt和E_{MOV}的影响

Fig.6　Effect of different L_B on k_1, Δt and E_{MOV}

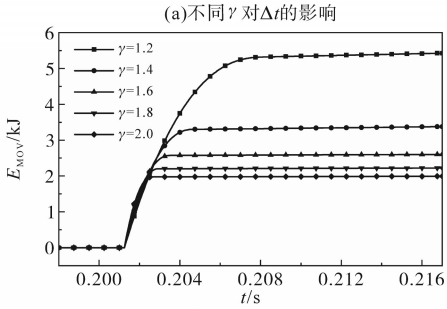
从图6a可以发现,随着L_B的增大,短路电流的上升率k_1减小,分断时间Δt增加。从图6b可以发现,随着L_B的增大,MOV吸收能量E_{MOV}增加,与第2节理论结论推导一致。

3.2.2　限电压能力系数γ对分断特性参数的影响

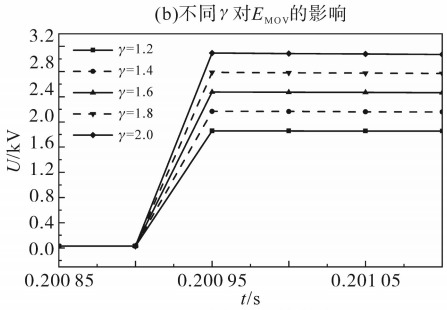
控制限流电感L_B为1.5 mH,分别在限电压能力系数γ为1.2,1.4,1.6,1.8,2.0时进行仿真试验,分析不同γ对分断参数的影响,仿真结果如图7所示。



(a)不同γ对Δt的影响



(b)不同γ对E_{MOV}的影响



(c)不同γ对k_2的影响

图7　不同γ对k_1,Δt,E_{MOV}和k_2的影响

Fig.7　Effect of different γ on k_1, Δt, E_{MOV} and k_2

从图7a可以发现,随着γ的增加,分断时间Δt不断减小。从图7b可以发现,随着γ的增加,MOV吸收能量E_{MOV}不断减小。从图7c可以发现,随着γ的增加,k_2不断增大。

3.3　仿真结果分析

SSCB分断过程中,断路器元件参数L_B和γ对分断特性参数k_1,k_2,Δt和E_{MOV}的影响结果汇总如表1所示。从第2节中可知,为提高断路器的分断性能,4种分断特性参数取值越小越好,但是分断特性参数间存在矛盾的相互关系,故采用多

表1　参数影响结果

Tab.1　Results of the impact of parameters

	增加L_B	增加γ
k_1	减少	不变
k_2	不变	增加
Δt	增加	减少
E_{MOV}	增加	减少
结果分析	矛盾	矛盾

目标优化设计方法，通过选取最适宜的固态断路器元件参数，使分断参数整体最优，从而实现对固态断路器分断性能的提高。

4　分断特性参数的优化设计

基于上述分断特性的分析，为解决SSCB元件参数与分断特性参数的优化问题，提出一种基于粒子群多目标优化算法的低压直流固态断路器分断特性参数优化设计方法。建立分断冲击性能指标、分断时间指标和吸收能量指标，以L_B和γ为决策变量，应用多目标粒子群算法进行优化求解。针对优化后的方案，提出一种结合决策者偏好的TOPSIS方法进行决策，选取最优的元件参数方案，提升SSCB的整体分断性能。

4.1　目标函数的建立

4.1.1　分断冲击性能目标函数f_k

开断过程中，断路器短路电流上升率k_1和分断电压上升率k_2的乘积构成第一个目标函数f_k，可用于衡量断路器的分断冲击性能，良好的抗冲击性能有利于延长器件的寿命，其表达式为

$$f_k = \mathrm{d}i/\mathrm{d}t \times \mathrm{d}u/\mathrm{d}t = k_1 \cdot k_2 \tag{13}$$

4.1.2　分断时间目标函数$f_{\Delta t}$

为衡量固态断路器分断过程的快速性指标，将电流上升阶段的时间与电流下降阶段的时间相加，构成第二个目标函数分断时间$f_{\Delta t}$：

$$f_{\Delta t} = \Delta t_1 + \Delta t_2 \tag{14}$$

4.1.3　吸收能量目标函数f_E

为衡量固态断路器分断过程的能量吸收指标，提升MOV器件的使用寿命，将MOV吸收的能量E_{MOV}构成了第三个目标函数f_E：

$$f_E = E_{MOV} \tag{15}$$

4.2　约束条件

为使优化的结果满足实际直流固态断路器的分断要求，结合实际要求，需要根据客观条件对决策变量进行约束。

4.2.1　限流电感L_B范围约束

在低压直流固态断路器的实际应用中，L_B过小会导致短路电流上升速率极大，造成功率器件击穿损坏；L_B过大会导致分断时间过长，影响分断性能。故需要对L_B范围做如下约束：

$$L_{min} \leqslant L_B \leqslant L_{max} \tag{16}$$

式中：L_{min}为限流电感下限值；L_{max}为限流电感上限值。

4.2.2　MOV限电压能力系数γ范围约束

MOV限电压能力系数γ决定了直流固态断路器分断过程中MOV的限制过电压能力。γ过小会导致电压钳位效果差，γ过大会导致断路器端电压过大，且受到过大的电压冲击容易使器件损坏。故需要对γ范围做如下约束：

$$\gamma_{min} \leqslant \gamma \leqslant \gamma_{max} \tag{17}$$

式中：γ_{min}为限电压能力系数的下限，取1.0；γ_{max}为限电压能力系数的上限，取2.0[13]。

4.3　优化算法设计

多目标粒子群算法（multi-objective particle swarm optimization，MOPSO）是基于粒子群算法改进的一种智能算法，主要用于解决多目标优化问题。相较于其他多目标优化算法，MOPSO收敛速度快，普适性强，算法具有并行性，优化过程中每个粒子都具有学习和记忆性，适用于对固态断路器元件参数选取的离散情况，同时易于实现，故采用MOPSO算法进行参数优化设计。

MOPSO具体原理如下式所示：

$$v_i^{k+1} = \omega \times v_i^k + c_1 \times (pbest_i^k - x_i^k) + c_2 \times (gbest^k - x_i^k) \tag{18}$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \tag{19}$$

式中：ω，c_1，c_2分别为惯量因子、局部速度因子、全局速度因子；v_i^k为第k代i个粒子的速度；x_i^k为第k代i个粒子的位置；$pbest$为个体极值点；$gbest$为全局极值点。

图8为MOPSO算法优化过程，在初始化$pbest$和$gbest$后，通过计算适应度值，不断迭代更新$pbest$和$gbest$，最终得到Pareto解集。

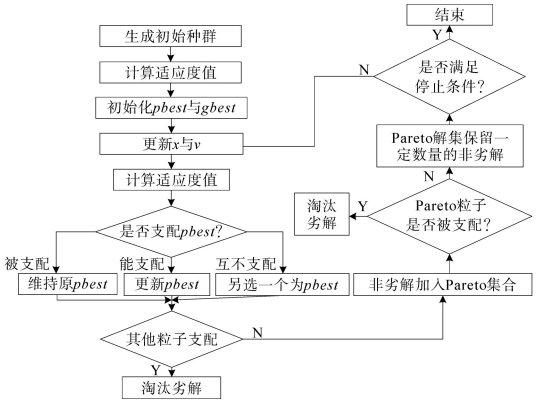


图8　MOPSO算法优化过程

Fig.8　Optimization process of the MOPSO algorithm

4.4　方案决策

为了从Pareto解集中的优化方案中选取最优方案，需要对优化方案进行决策。TOPSIS方法可以对决策变量为离散型、具有有限数量的备选方案进行评价，排定先后顺序，最终选出最佳的方

案。该方法可以有效地做出全局性评价，适用于对固态断路器分断优化参数进行决策，故选取TOPSIS方法进行方案决策。

TOPSIS方法进行方案决策的原理为：首先创建向量规范法得到规范决策矩阵，根据优化方案的每个目标在决策中所占的权重不同，构造决策者偏好加权的规范化矩阵；其次确定正理想解向量和负理想解向量，计算各个优化方案到正理想解的距离d^+和负理想解的距离d^-；最后计算各个方案解的贴合度C^*，计算方法如下：

$$C^* = d^-/(d^+ + d^-) \tag{20}$$

对贴合度C^*的大小进行排序，C^*值最大说明该方案距离正理想解的距离最近而距离负理想解的距离最远，该方案为最优方案。

4.5 优化结果分析

4.5.1 MOPSO算法优化结果

本文中MOPSO算法的设计参数如下：迭代次数2 000，粒子数量100，惯性因子ω=0.75，局部速度因子c_1=0.3，全局速度因子c_2=0.5。利用MOPSO算法对限流电感和MOV限电压能力系数进行寻优，可以得到优化后的固态断路器元件参数方案集合，如图9所示，其中三个坐标分别为分断冲击性能目标f_k，分断时间目标$f_{\Delta t}$和能量吸收目标f_E。从图9中的优化结果可以看出，优化后的方案相互间无支配关系，相比于原有方案而言，优化后方案在三个目标上均取得较好效果。

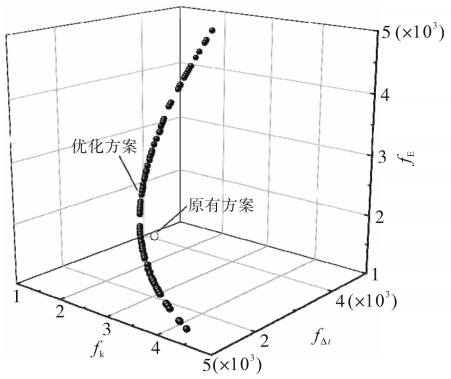


图9　Pareto优化解集结果

Fig.9　Results for Pareto optimized solution sets

4.5.2 优化方案TOPSIS决策结果

对优化后的固态断路器元件参数方案进行决策，通过配置不同的权重方案，获得不同偏好的最优方案。根据三个目标（分断冲击性能f_k、分断时间$f_{\Delta t}$和吸收能量f_E）设计了四类典型的决策者偏好权重，其中A类决策更关注分断过程受到的冲击，三个目标权重为50%，25%，25%；B类决策更关注分断时间，三个目标权重为25%，50%，25%；C类决策更关注吸收能量，三个目标权重为25%，25%，50%；D类决策对三个目标没有偏好，对三个目标需同时兼顾，其三个目标权重为33.3%，33.3%，33.3%。将这四类决策偏好权重结合TOPSIS方法，可得到四类决策结果。

根据TOPSIS决策结果如表2所示，与原方案相比，各个方案中三个目标均有明显的优化。A类决策最优方案中，f_k目标优化了11.5%，$f_{\Delta t}$目标优化了1.5%，f_E目标优化了0.6%，分断冲击性能优化效果显著。B类决策最优方案中，f_k目标优化了3.6%，$f_{\Delta t}$目标优化了8.0%，f_E目标优化了7.1%，分断时间优化效果显著。C类决策最优方案中，f_k目标优化了1.2%，$f_{\Delta t}$目标优化了9.9%，f_E目标优化了10.4%，能量吸收优化效果显著。D类决策最优方案中，f_k目标优化了5.9%，$f_{\Delta t}$目标优化了5.6%，f_E目标优化了5.2%，各个目标得到了均衡的优化。

表2　各类优化方案结果

Tab.2　Results of various optimization options

	L_B/mH	γ	f_k/(kV·kA·ms^{-2})	$f_{\Delta t}$/μs	f_E/J
原方案	1.200	1.50	2 742	2 347	1 842
A类决策	1.710	1.87	2 426	2 312	1 831
B类决策	1.571	1.89	2 645	2 160	1 711
C类决策	1.535	1.90	2 710	2 114	1 650
D类决策	1.600	1.88	2 580	2 216	1 747

通过这种方式可以赋予固态断路器参数优化配置以极大的灵活性，决策者可根据不同的设计需求和偏好意图设计不同的权重系数，有针对性地选择不同的优化方案，具有一定的参考价值。

5 实验验证

5.1 实验平台搭建

在实验室环境下搭建实验室低压原理样机，对短路故障发生时的电流分断特性进行验证，图10为实验电路实物图。考虑到实验室人身安全限制，对直流电源电压为50 V、负载电阻为100 Ω进行测试。实验器件的选取上，IGBT模块的型号采用IKW50N60T，控制信号由STM32单片机产生，单片机采用ARM Cortex-M为内核的stm32f103rct6芯片，通过Keil5软件进行程序编写，控制IGBT器件的通断。驱动模块采用EG3116D芯片进行IGBT器件驱动，电流由霍耳传感器采集，并通过示波器进行显示，MOV采用型号为20D560K的压敏电阻，进行能量的吸收。

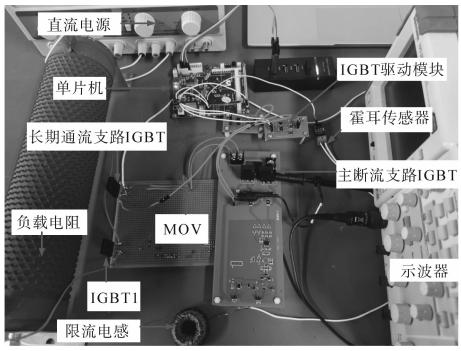


图10　实验电路实物图

Fig.10　Physical diagram of the experimental circuit

5.2　实验结果分析

通过实验测试了低压直流固态断路器的短路故障时的工作波形，进行实验并滤除杂波后分别得到了系统的短路电流I_d，长期通流支路的波形I_1，主断流支路的电流I_2，能量吸收支路的电流I_3，如图11所示。

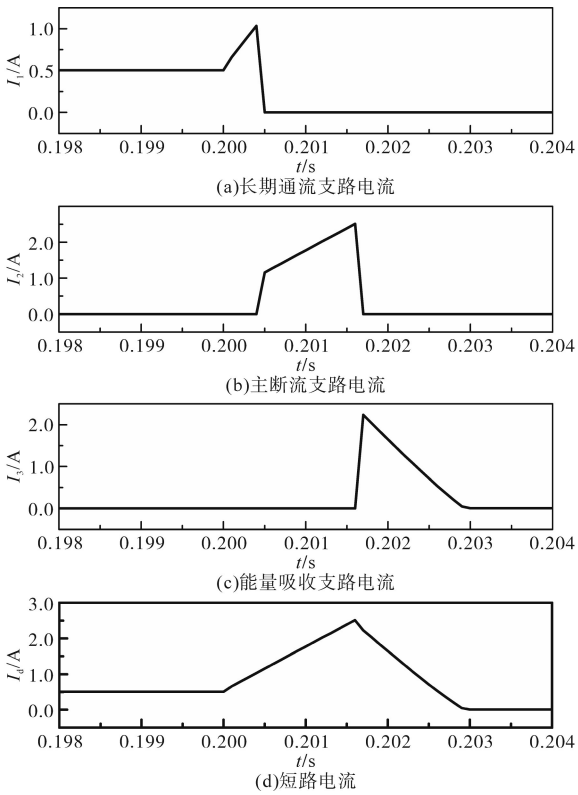


图11　实验电路波形图

Fig.11　Waveform diagrams of the experimental circuit

正常通流时，电流流过长期通流支路的IGBT，负载电流为0.5 A。0.2 s时短路故障发生，IGBT1导通，负载电阻R_L短路，短路电流迅速上升，当短路电流达到长期通流支路最大分断电流1 A时，长期通流支路IGBT断开，I_1下降，如图11a所示；同时主断流支路IGBT导通，I_2持续上升，如图11b所示；当I_2达到主断流支路最大分断电流2.5 A时，主断流支路IGBT断开，短路电流转移到MOV中，由MOV进行能量的吸收，短路电流逐渐衰减为零，如图11c所示；图11d为短路故障后短路电流的波形图，可知从短路故障发生时到故障完全切除耗时2.9 ms。

由实验结果可知，短路故障发生后实验室样机可以在短时间内切除故障，具有工程实际应用价值，且与上文短路故障电流分断特性分析一致，该实验可以充分验证低压直流固态断路器在原理设计上的可行性。

6　结论

为对固态断路器结构进行优化，本文设计了额定电压为1.5 kV双桥式低压直流固态断路器的拓扑结构，建立了断路器分断过程的数学模型，通过理论和仿真分析，确定了SSCB的元件参数L_B和γ对分断性能的影响。为解决断路器参数L_B和γ的优化问题，提出一种低压直流固态断路器分断参数的多目标优化方法，建立了基于断路器分断特性的目标函数，通过MOPSO算法对目标函数进行优化，采用结合决策者偏好的TOPSIS方法对优化方案进行决策。优化结果表明，优化后的SSCB元件参数L_B和γ显著提高了固态断路器的分断性能。最后在实验室环境下搭建低压直流固态断路器样机，验证了SSCB设计的可行性，对固态断路器的设计具有指导意义。

参考文献

[1]　彭振东，任志刚，姜楠，等. 新型直流固态限流断路器设计与分析[J]. 中国电机工程学报，2017，37(4)：1028-1036.
PENG Zhendong，REN Zhigang，JIANG Nan，et al. Design and analysis for a novel DC solid state current limiting circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE，2017，37(4)：1028-1036.

[2]　丁璨，聂太平，陈天凡，等. 基于IGBT的新型固态直流断路器设计与分析[J]. 高压电器，2022，58(4)：17-24.
DING Can，NIE Taiping，CHEN Tianfan，et al. Design and analysis of new type of solid-state DC circuit breaker based on IGBT[J]. High Voltage Apparatus，2022，58(4)：17-24.

[3]　陶翔，张艳霞，杨国杰，等. 基于IGBT的新型混合式高压直流断路器及控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报，2018，30(3)：98-105.
TAO Xiang，ZHANG Yanxia，YANG Guojie，et al. Novel hybrid HVDC circuit breaker based on IGBT and its control strategy[J]. Proceedings of the CSU-EPSA，2018，30(3)：98-105.

[4]　刘伟，马海超，张海涛，等. 配电网用全固态混合式直流断路器研发[J]. 南方电网技术，2016，10(4)：37-42.

（下转第60页）

LI Bin, JIA Hanru, HE Jiawei, et al. Improved topology of hybrid DC fault current limiter and its parameter designmethod [J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(1): 140-149.

[14] 贺之渊,王威儒,谷怀广,等. 兼备故障限流及开断功能的直流电网集成化关键设备发展现状及展望[J]. 中国电机工程学报,2020,40(11):3402-3417.
HE Zhiyuan, WANG Weiru, GU Huaiguang, et al. Development status and prospect of integrated key equipment of DC power grid with fault current limiting and breaking functions[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(11): 3402-3417.

[15] MERLIN M M C, SANCHEZ D S, JUDGE P D, et al. The extended overlap alternate arm converter: a voltage-source converter with DC fault ride-through capability and a compact design[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(5): 3898-3910.

[16] 宋强,杨文博,李笑倩,等. 集成直流断路器功能的模块化多电平换流器[J]. 中国电机工程学报,2017,37(20):6004-6013.
SONG Qiang, YANG Wenbo, LI Xiaoqian, et al. An MMC topology integrated with DC circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(20): 6004-6013.

[17] 马保慧,程盛,史书怀,等. 基于混合子模块MMC结构的直流变压器控制策略[J]. 电气传动,2019,49(10):75-79.
MA Baohui, CHENG Sheng, SHI Shuhuai, et al. Control strategy of DC transformer based on hybrid submodule MMC structure[J]. Electric Drive, 2019, 49(10): 75-79.

[18] JUN Qin, SAEEDIFARD M, ROCKHILL A, et al. Hybrid design of modular multilevel converters for HVDC systems based on various submodule circuits[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(1): 385-394.

[19] LEE J H, JUNG J J, SUL S K. Balancing of submodule capacitor voltage of hybrid modular multilevel converter (MMC) under DC bus voltage variation of HVDC system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(11): 10458-10470.

[20] 张建忠,陈桂,张雅倩,等. 混合型MMC非闭锁型直流短路故障穿越策略分析和比较[J]. 电力自动化设备,2021,41(4):41-47,63.
ZHANG Jianzhong, CHEN Gui, ZHANG Yaqian, et al. Analysis and comparison of non-blocking DC short circuit fault ride-through strategies for hybrid MMC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(4): 41-47, 63.

[21] SONG Qiang, ZENG Rong, YU Zhanqing, et al. A modular multilevel converter integrated with DC circuit breaker[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(5): 2502-2512.

[22] ZHAO Xiaodong, LI Binbin, ZHANG Bingxu, et al. A high-power step-up DC/DC converter dedicated to DC offshore wind farms[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 37(1): 65-69.

收稿日期:2022-04-12
修改稿日期:2022-07-11

(上接第47页)

LIU Wei, MA Haichao, ZHANG Haitao, et al. Development of solid hybrid DC circuit breaker for DC distribution network[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(4): 37-42.

[5] 朱童,余占清,曾嵘,等. 全固态直流断路器在低压直流配电系统中的应用[J]. 南方电网技术,2016,10(4):50-56.
ZHU Tong, YU Zhanqing, ZENG Rong, et al. Application of all-solid-state circuit breaker in low-voltage DC distribution system [J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(4): 50-56.

[6] 朱金保. 从应用场所需求谈低压直流断路器[J]. 电器与能效管理技术,2019(22):23-29.
ZHU Jinbao. Discussion on low voltage DC circuit breakers from application field requirements[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2019(22): 23-29.

[7] DING C, NIE T, TIAN X, et al. Analysis of the influence of RC buffer on DC solid-state circuit breaker[J]. Energy Reports, 2020, 6: 1483-1489.

[8] WU T, WANG Z, FANG C, et al. Research on current limiting solid state circuit breaker for DC microgrid[J]. Electric Power Systems Research, 2022, 209(Aug.): 107950.

[9] LIAO X, LI H, YAO R, et al. Voltage overshoot suppression for SiC MOSFET-based DC solid-state circuit breaker[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2019, 9(4): 649-660.

[10] 卫思明,张一工,张森. 新型固态直流断路器时序控制策略研究[J]. 陕西电力,2015,43(4):45-50.
WEI Siming, ZHANG Yigong, ZHANG Sen. Study on time sequence control strategies of new solid state DC circuit breaker [J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(4): 45-50.

[11] 胡杰,王莉,穆建国. 直流固态断路器现状及应用前景[J]. 电力系统保护与控制,2009(19):145-150.
HU Jie, WANG Li, MU Jianguo. Present status of DC solid-state circuit breaker and its potential application[J]. Power System Protection and Control, 2009(19): 145-150.

[12] 丁锐,石新春. 碳化硅 MOSFET 用于500 V低压直流断路器的可行性研究[J]. 电测与仪表,2017,54(14):64-69.
DING Rui, SHI Xinchun. The silicon carbide MOSFET feasibility study for 500 V low voltage DC circuit breaker high voltage appliances[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(14): 64-69.

[13] 丁璨,聂太平,田小健,等. 一种配网级联式固态直流断路器的拓扑设计[J]. 南方电网技术,2021,15(5):29-35.
DING Can, NIE Taiping, TIAN Xiaojian, et al. A topology design of cascade solid-state DC circuit breaker with distribution network[J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(5): 29-35.

收稿日期:2022-10-10
修改稿日期:2022-11-04