大容量永磁偏置型故障限流器的经济性分析与优化

邹 亮¹, 伍珈乐¹, 刘 涛², 赵 彤¹, 张 黎¹
(1. 山东大学 山东省特高压输变电技术与装备重点实验室, 山东 济南 250061;
2. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206)

摘要:构建了永磁偏置型故障限流器 PMFCL 的经济性分析模型,包括材料成本和运行成本两部分。材料成本取决于 PMFCL 的关键结构参数,基于等效磁路法导出了 PMFCL 4 个关键结构参数与电感和、电感比以及 他和深度比这 3 个独立电磁变量间的函数关系;运行成本由铁芯损耗和绕组铜耗组成,并给出了各自的计算 方法。针对 500 kV PMFCL 经济性分析实例,分析了电磁变量对 PMFCL 经济性的影响,并建立其经济性优化 模型,求得了 PMFCL 的最优成本和对应的结构参数。结果表明,在高压大容量应用场合,PMFCL 具有较好的 经济性优势。Ansoft Maxwell 二维有限元仿真验证了经济性优化模型的合理性。

关键词:永磁偏置型故障限流器;经济性分析;优化;材料成本;运行成本;电磁变量;等效磁路法

中图分类号: TM 51 文献标识码: A

0 引言

随着我国电力系统容量和规模的不断扩大,如 何限制不断攀升的短路电流水平成为电网发展中一 个不可回避的重大技术和经济问题[1-3]。近年来,由 永磁体、软磁铁芯和铜绕组构成的永磁偏置型故障 限流器 PMFCL(Permanent-Magnet-biased saturation based Fault Current Limiter),因具有较好的应用前 景而逐渐受到关注。从限流原理分析,当系统正常 运行时,铁芯因永磁体产生的强大直流偏置磁场而 处于深度饱和状态,此时 PMFCL 对外表现为低感 抗:当系统出现短路故障时,电流激增使绕组产生足 以抵消永磁体的磁动势,铁芯工作点将从饱和区进 入线性区域,此时限流器对外表现为高感抗,从而起 到限流作用。PMFCL 结构简单, 无需外加电源和 控制装置即可实现自动投切,响应时间快且具有自 恢复能力,通过合理的拓扑结构设计可实现较好的 性能,是集检测、转换和限流功能于一体的常规材料 型故障限流技术[4-6]。

国内外许多学者已对 PMFCL 开展了仿真与实验研究,但多侧重于限流器拓扑结构设计和磁特性研究等技术性问题,且主要面向低压小短路电流场合。文献[7-8]提出了一种永磁并联偏置方式的"日"字形磁路结构,文献[9-10]提出了一种"口"字形磁路拓扑,文献[11]提出了一种直线式 PMFCL

拓扑结构。文献[12]建立了以饱和深度比、电感比与电感和为基本变量的 PMFCL 结构参数设计及优 化算法。文献[13]研究了直线式 PMFCL 的漏磁效应 问题,并进行了实验验证。

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.12.012

无论何种故障限流器,其只有安装在 220 kV 及 以上电压等级的电网中,即实现高压大容量化,才能 真正体现其工程应用价值。随着电压等级的提高, 限流器的材料成本将大幅增加,各种运行损耗产生 的附加费用亦不可忽略,可见大容量限流器的经济 性比技术性更加主导其应用价值。因此,建立大容 量限流器的经济性分析模型,并将其成本与结构参 数、电磁变量等结合起来,实现技术性与经济性的综 合优化,是限流器实现高压大容量化的关键。然 而,目前国内外鲜有研究限流器经济性问题的文献。

本文基于表征 PMFCL 特性的电感比、电感和以 及饱和深度比 3 个独立电磁变量,建立了其经济性 分析模型,提出一种将 PMFCL 经济性优化转化为 3 个电磁变量优化组合问题的方法。结合 500 kV 限 流器经济性分析实例,分析了电磁变量对 PMFCL 经 济性的影响,并求得 PMFCL 最优成本及对应的结构 参数。最后通过有限元仿真验证了经济性优化计算 结果的合理性。

1 PMFCL 经济性分析模型

本文选用直线式 PMFCL 研究其经济性,磁拓扑 如图 1 所示。直线式 PMFCL 由 2 对相互配合的铁 芯、缠绕在铁芯上的绕组以及配置在铁芯两端的永 磁体组成,左右 2 组分别用来限制正、负半波的短路 电流^[11-13]。这种拓扑中永磁体和铁芯的结构参数 相对独立,便于进一步设计与优化。

由于 PMFCL 的结构与油浸式变压器类似,本文

收稿日期:2015-10-30;修回日期:2016-10-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51307102);高等学校博 士学科点专项科研基金资助项目(20130131120012);新能源电 力系统国家重点实验室开放课题(LAPS14007)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (51307102), Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education(20130131120012) and State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources(LAPS14007)



图 1 直线式 PMFCL 拓扑结构 Fig.1 Topological structure of straight-ine PMFCL

引入评价变压器经济效益的总拥有费用 TOC (Total Owning Cost)^[14-15]法,将 PMFCL 的总拥有费用定义 为其材料成本与运行成本之和,而忽略在规划、制 造、安装和维修等过程中产生的其他费用。故单相

半波 PMFCL 的经济性分析模型为.

$$W = W + W \tag{1}$$

其中,W为 PMFCL 的总拥有费用(万元); W_x 和 W_y 分别为其材料成本和运行成本(万元)。则单相全波 PMFCL 的总费用为 2 W, 三相全波 PMFCL 的总费用 为 6 W。

下面分别建立单相半波 PMFCL 材料成本 W_x和运行成本 W_y的数学模型。

1.1 材料成本 W,

由于绕组的用量和单价均远低于永磁体和铁芯,故绕组产生的费用忽略不计,定义 PMFCL 的材料成本 W_x为永磁体与铁芯所耗费用之和。可知,在单位体积造价不变的前提下,PMFCL 的材料成本仅与永磁体和铁芯的体积有关,其数学模型如下:

$$W_x = \alpha_m V_m + \alpha_e V_e$$
 (2)
其中, α_m 和 α_e 分别为永磁体和铁芯的材料成本系数,表示单位体积的造价(万元/m³); V_m 和 V_e 分别为
永磁体和铁芯的体积(m³)。

 $V_{\rm m}$ 和 $V_{\rm e}$ 可由 PMFCL 的 4 个关键结构参数,即 永磁体等效磁路长度 $l_{\rm m}$ 、铁芯等效磁路长度 $l_{\rm e}$ 、永 磁体截面积 $S_{\rm m}$ 和铁芯截面积 $S_{\rm e}$ 确定,故式(2)可 改写为:

$$W_{\rm x} = \alpha_{\rm m} S_{\rm m} l_{\rm m} + \alpha_{\rm e} S_{\rm e} l_{\rm e} \tag{3}$$

因此,PMFCL 材料成本建模的基本思路为依据 等效磁路法,并参照永磁体、软磁铁芯的磁性参量及 线路的电气参量,导出 PMFCL 的 4 个关键拓扑参数 的数学表达式。

为简化分析,首先作如下假设:磁场在软磁铁芯 及永磁体内均匀分布,且忽略漏磁通的影响;铁芯 B-H曲线近似为三折线型,且不计铁芯磁滞效应的 影响;各媒质均为各向同性磁媒质,且忽略时变场频 率的影响。

现以 PMFCL 限制正半波故障电流的过程为例 展开分析。根据安培环路定律可知:

$$Ni - H_c' l_m + R_m \phi_m + H_e l_e = 0 \tag{4}$$

其中, N为半波限流绕组匝数; i为绕组电流; H'_e = B_r/μ_m , 为永磁体计算矫顽力, B_r 为永磁体剩磁, μ_m

为永磁体的回复系数; $R_m = l_m / (\mu_m S_m)$ 为永磁体的磁 阻; ϕ_m 为通过永磁体的磁通; H_e 为铁芯磁场强度。

根据磁通连续性原理,可认为通过铁芯的磁通 量 ϕ_e 与 ϕ_m 近似相等。考虑到 PMFCL 工作于工频 交流系统中,i、 ϕ_m 及 H_e 均为时间 t 的函数,将式(4) 对 t 求导并结合磁参量 ϕ_e 与 H_e 间的关系可推出限 流绕组两端的感应电压 u 为:

$$u = -N \frac{\mathrm{d}\phi_{\mathrm{e}}}{\mathrm{d}t} = \frac{N^2}{l_{\mathrm{e}}/(\mu S_{\mathrm{e}}) + R_{\mathrm{m}}} \frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}$$
(5)

其中,μ为铁芯磁导率。因此,半波限流器的饱和 电感L_s与不饱和电感L_u的表达式分别为:

$$L_{\rm s} = \frac{N^2}{R_{\rm s} + R_{\rm m}} \tag{6}$$

$$L_{\rm u} = \frac{N^2}{R_{\rm u} + R_{\rm m}} \tag{7}$$

其中, $R_s = l_e / (\mu_s S_e)$ 为铁芯的饱和磁阻, μ_s 为铁芯的 饱和磁导率; $R_u = l_e / (\mu_u S_e)$ 为铁芯的不饱和磁阻, μ_u 为铁芯的不饱和磁导率。考虑到 $\mu_u \gg \mu_m, R_u \ll R_m$,故 式(7)可改写为:

$$L_{\rm u} = \frac{N^2}{R_{\rm m}} = \frac{N^2 \mu_{\rm m} S_{\rm m}}{l_{\rm m}}$$
(8)

在工作过程中,PMFCL 共表现出 3 种能力:短路电流限制能力、铁芯在正向饱和态与不饱和态之间的转换能力以及永磁体对铁芯的磁偏置能力。以上 3 种能力可分别用电感和变量 ρ 、电感比变量 λ 及饱和深度比变量 K_s 3 个独立电磁变量表征,定义式分别为:

$$\rho = L_{\rm s} + L_{\rm u} \tag{9}$$

$$\lambda = \frac{L_{\rm u}}{L_{\rm s}} - 1, \ \lambda > 0 \tag{10}$$

$$K_{\rm s} = \frac{B_{\rm eli=0} - B_{\rm s}}{B_{\rm eli=0}} \times 100\%, \ 0 < K_{\rm s} < 100\%$$
(11)

其中,B_{eli=0}为绕组电流为零时铁芯的磁感应强度;B_s 为铁芯的饱和磁感应强度。将式(6)与式(8)代入电 感比变量定义式(10)中可得:

$$\frac{l_{\rm e}}{l_{\rm m}} = \lambda \frac{\mu_{\rm s}}{\mu_{\rm m}} \frac{S_{\rm e}}{S_{\rm m}} \tag{12}$$

当绕组电流为零时,铁芯工作于饱和区,磁场强度 H_e可表示为:

$$H_e = \frac{B_s}{\mu_u} + \frac{B_{eli=0} - B_s}{\mu_s}$$
(13)

联立式(4)和式(13),并令 i=0 且忽略 R_u 的影 响,可导出 $S_e/S_m 与 \lambda \langle K_s \rangle$ 间的关系:

$$\frac{S_e}{S_m} = \frac{B_r}{B_s} \frac{1 - K_s}{\lambda K_s + 1} \tag{14}$$

其中,B_r为永磁体剩磁。

此外,为将前述 PMFCL 的 3 种能力均控制在合理的范围之内,特定义 2 个边界条件变量:可限制的最大短路电流 i_{max} 和可限制的最小短路电流 i_{min}。当

Ð

短路电流超过 i_{max} 时,将导致铁芯达到反向饱和状态,使限流器丧失限流能力;当短路电流低于 i_{min} 时, 刚好使铁芯退出正向饱和状态而开始限流。利用式 (4)可导出 i_{max} 和 i_{min} 的表达式分别为:

$$i_{\text{max}} = \frac{H_c' l_{\text{m}} + \phi_{\text{s}} R_{\text{m}}}{N} = \frac{l_{\text{m}}}{\mu_{\text{m}} N} \left(B_{\text{r}} + B_{\text{s}} \frac{S_{\text{e}}}{S_{\text{m}}} \right)$$
(15)

$$i_{\min} = \frac{H'_{e} l_{m} - \phi_{s} R_{m}}{N} = \frac{l_{m}}{\mu_{m} N} \left(B_{r} - B_{s} \frac{S_{e}}{S_{m}} \right)$$
(16)

基于上述分析,联立式(8)—(10)及式(12)—(16),可建立 PMFCL 的 4 个关键结构参数与 3 个独 立电磁变量间的函数关系^[12]为:

$$l_{\rm m} = \frac{N\mu_{\rm m}i_{\rm max}}{B_{\rm r} \left(1 + \frac{1 - K_{\rm s}}{1 + \lambda K_{\rm s}}\right)} \tag{17}$$

$$l_{e} = \frac{N\mu_{s}\lambda i_{\max}}{B_{s}\left(1 + \frac{1 + \lambda K_{s}}{1 - K_{s}}\right)}$$
(18)

$$S_{\rm m} = \frac{\rho(\lambda+1)i_{\rm max}}{NB_{\rm r}(\lambda+2)\left(1 + \frac{1-K_{\rm s}}{1+\lambda K_{\rm s}}\right)}$$
(19)

$$S_{e} = \frac{\rho(\lambda+1)i_{\max}}{NB_{s}(\lambda+2)\left(1+\frac{1+\lambda K_{s}}{1-K_{s}}\right)}$$
(20)

将式(17)—(20)代入式(3),得单相半波 PMFCL 的材料成本为:

$$W_{x} = \alpha_{m} S_{m} l_{m} + \alpha_{e} S_{e} l_{e} = \frac{\alpha_{m} \mu_{m} \rho (\lambda + 1)}{\lambda + 2} \left[\frac{i_{max}}{B_{r} \left(1 + \frac{1 - K_{s}}{\lambda K_{s} + 1} \right)} \right]^{2} + \frac{\alpha_{e} \mu_{s} \rho \lambda (\lambda + 1)}{\lambda + 2} \left[\frac{i_{max}}{B_{s} \left(1 + \frac{\lambda K_{s} + 1}{1 - K_{s}} \right)} \right]^{2}$$
(21)

由式(21)知,PMFCL的材料成本是 ρ_{λ} 和 K_s 的 函数,材料成本的优化可转化为这3个独立电磁变 量的优化组合问题。

1.2 运行成本 W,

PMFCL 的运行成本 W, 定义为在其寿命期内产 生总损耗所对应的费用,寿命期通常选取为 20~30 a。 由 PMFCL 的工作原理可知,总损耗应为铁芯损耗和 绕组铜耗之和,故 PMFCL 运行成本的表达式为:

$$W_{\rm y} = \beta_0 P_0 + \beta_{\rm k} P_{\rm k} \tag{22}$$

其中, P_0 和 P_k 分别为 PMFCL 的铁芯损耗和绕组铜 耗(kW); β_0 和 β_k 分别为铁芯和绕组的运行成本系 数,分别表征在整个运行寿命内每 kW 铁芯损耗和 绕组铜耗的等值费用(万元/kW)。

下文分别分析 PMFCL 铁芯损耗和绕组铜耗的 组成。

1.2.1 铁芯损耗

依据 Bertottti 铁芯损耗分离计算模型^[16-17],在不考虑集肤效应的条件下,PMFCL 的铁芯损耗可由式

(23)得出。

 $P_0 = (P_h + P_{ec} + P_{ex})\rho_e V_e =$

 $(K_{h}fB_{0}^{*}+K_{ec}f^{2}B_{0}^{2}+K_{ex}f^{15}B_{0}^{15})\rho_{e}S_{e}l_{e}$ (23) 其中, P_{h} 、 P_{ec} 和 P_{ex} 分别为单位质量的磁滞损耗、涡流 损耗和附加损耗(W/kg); B_{0} 为铁芯的磁感应强度幅 值,由于系统正常工作时铁芯处于深度饱和状态,故 可选取 B_{0} =(1.05~1.2) B_{s} ; ρ_{e} 为铁芯的密度; K_{h} 、 K_{ec} ,x、 K_{ex} 为与铁芯材料有关的系数,可通过损耗特性曲线 拟合得到。

因此,当铁芯材料和单位质量的损耗确定后,铁芯损耗就是铁芯体积 V。的函数。

1.2.2 绕组铜耗

对于大容量 PMFCL,其绕组铜耗主要由绕组直流电阻损耗和绕组在漏磁场下的涡流损耗两部分组成。由于后者所占比重很小,故可认为绕组铜耗近似等于直流电阻损耗。参考变压器绕组损耗计算方法^[18-19],得到 PMFCL 绕组铜耗的计算公式为:

$$P_{\rm k} = I^2 R_{\rm c} \tag{24}$$

$$R_{e} = \rho_{e} \frac{l_{e}}{S_{e}} = \rho_{e} \frac{4N\sqrt{S_{e}}}{S_{e}}$$
(25)

其中, P_k 为绕组的直流电阻损耗;I为正常运行时流 过绕组的负荷电流; R_e 为绕组的直流电阻,由绕组导 线尺寸和材料的物理参数决定; l_e 和 S_e 分别为导线 的长度和截面积; ρ_e 为温度为t时铜的电阻率。

已知 15 ℃ 时铜的电阻率 ρ_{15} = 1.75×10⁻⁸ Ω ·m, 则 ρ_{e} 与 ρ_{15} 的换算关系如下:

$$\rho_{\rm c} = \rho_{15} \frac{234.5 + t}{234.5 + 15} \tag{26}$$

此处需将直流电阻损耗矫正到 75 ℃ 温度下。令 *t*=75,并将式(25)和式(26)代入式(24),可得:

$$P_{\rm k} = 4.96 I^2 \rho_{15} \frac{N\sqrt{S_{\rm e}}}{S_{\rm c}} \tag{27}$$

由式(27)可知,在导线选型、绕组匝数以及绕组 电流均确定的条件下,绕组铜耗 P_k 仅与铁芯截面积 S_e有关。

综合铁芯损耗费用和绕组铜耗费用,单相半波 PMFCL的运行成本可进一步表示为:

$$W_{y} = \beta_{0} P_{0} + \beta_{k} P_{k} = \beta_{0} (K_{h} f B_{0}^{*} + K_{ec} f^{2} B_{0}^{2} + K_{ex} f^{1.5} B_{0}^{1.5}) \rho_{e} S_{e} l_{e} + \beta_{k} \frac{4.96 N I^{2} \rho_{15} \sqrt{S_{e}}}{S_{e}}$$
(28)

可知, 硅钢片与绕组导线型号选定之后, 系统正常工作时, PMFCL的运行成本仅与铁芯等效磁路长度 *l*。和铁芯截面积 *S*。相关。

将式(28)和式(21)代入式(1)可得单相半波 PMFCL的经济性分析模型。可知,在材料选型一定的条件下,PMFCL的总拥有费用W是4个关键结构 参数的函数,受电磁变量 ρ_{λ} 和 K_{s} 的影响。因此, PMFCL的经济性优化可转化为3个独立电磁变量 的优化组合问题。

2 PMFCL 经济性分析实例

2.1 参数设置

参考华东电网 500 kV 限流器示范工程^[20-23],建 立如图 2 所示的单电源系统模型。系统相电压有效 值 U_{s} = 288.68 kV,频率 f = 50 Hz,电源内阻抗 Z_{s} = 0.49 + j5.64 Ω ,系统正常运行时的线路负荷电流为 2 kA,故障后的短路电流稳态有效值为 51 kA。



图 2 串联 PMFCL 的单电源系统模型

Fig.2 Single-source system model with serial PMFCL

绕组选择型号为 ZB5.60×13.20-0.45 的纸包扁 铜线,则并绕根数为 8 时的导线等效截面积 S_e = 591.36 mm²,绕组匝数 N=100。铁芯选用冷轧取向 硅钢 DW540-50,永磁体选用钕铁硼 N35,相关磁性 参数如表 1 所示。已知材料密度和市场单价,可换 算得到铁芯和永磁体的材料成本系数,如表 2 所示。

表1 PMFCL 的磁性参数

Table 1	Magnetic parameters of PMFCL
磁性材料	磁性参数
	$B_{\rm s} = 1.6 {\rm T}$
	$\mu_{\rm s} = 4\mu_0 = 4.98 \times 10^{-6} {\rm Wb/(A \cdot m)}$
	$\mu_{\rm u} = 2411 \mu_0 = 3.03 \times 10^{-3} {\rm Wb/(A \cdot m)}$
铁芯	$B_0 = 1.15B_s = 2.05 \text{ T}$
DW540-50	$K_{\rm h} = 0.0319$
	$K_{\rm ec} = 1.494 \times 10^{-4}$
	<i>x</i> = 1.898
	$K_{\rm ex} = 1.435 \times 10^{-8}$
うかけ	$B_{\rm r} = 1.22 {\rm T}$
水磁14 N35	$H_{\rm c} = 8.68 \times 10^5 {\rm A/m}$
1133	$\mu = 1.12 \mu_0 = 1.4 \times 10^{-6} \text{ Wb}/(\text{A} \cdot \text{m})$

注:永磁体和铁芯价格参考 2014 年国内平均价格。

表 2 PMFCL 的材料成本系数

```
Table 2 Material cost coefficients of PMFCL
```

磁性材料	密度/ (kg·m³)	单价/ (万元・t ⁻¹)	材料成本系数/ (万元・m ⁻³)
铁芯 DW540-50	$\rho_{\rm e} = 7.65 \times 10^3$	1.60	$\alpha_{\rm e} = 12.24$
永磁体 N35	$\rho_{\rm m} = 7.5 \times 10^3$	14.0	$\alpha_{\rm m} = 105.0$

注:永磁体和铁芯价格参考 2014 年国内平均价格。

因目前缺乏 PMFCL 的实际运行数据,参考各国 变压器的空载损耗与负载损耗情况^[14],选取 PMFCL 的运行成本系数 β_0 和 β_k 分别为 4.87 万元/kW 和 2.05 万元/kW。

2.2 电磁变量对 PMFCL 经济性的影响

为便于将 PMFCL 经济性与华东电网限流器示范工程进行对比分析,设定两者的限流能力相同,均

可将有效值为 51 kA 的短路电流限制到 20 kA。 PMFCL 限流能力确定后,意味着其电感和变量ρ也 就确定了。为避免铁芯反向饱和而失去限流能力, 设计 PMFCL 时应留有一定裕量,将可限制的最大短 路电流 *i*max 设定为限流后短路电流峰值的 1.2 倍:

$$\frac{i_{\max}}{120\% \times \sqrt{2}} = \frac{U_{ss}}{\sqrt{(R_{ss} + R_c)^2 + \omega^2 (L_{ss} + \rho)^2}}$$
(29)

其中, R_{s} , L_{s} 分别为电源的等效电阻与电感; R_{e} 为限 流器的绕组电阻,鉴于 PMFCL 的铁芯截面积 S_{e} 约 为 2 m²,为便于计算,依据式(25)取其近似值 0.02 Ω_{o}

由此, i_{max} = 120% × $\sqrt{2}$ × 20 = 33.94(kA), 据式 (29), 可得 PMFCL 的电感和 ρ = 27.96 mH。

在电感和 ρ 确定的基础上,可分别得到 PMFCL 材料成本 W_x 和总拥有费用 W 随电感比 λ 、饱和深 度比 K_x 的变化曲线,分别如图 3 和图 4 所示。

由图 3 可知, PMFCL 材料成本 W_x 随电感比 λ 的增大而升高, 随饱和深度比 K_s 的变化趋势与 λ 的 取值大小有关。当 λ 取值较小时, W_x 随 λ 的增大而 升高; 而当 λ 取值较大时, W_x 随 K_s 的增大呈现先降 低后升高的趋势。因此, 为了降低 PMFCL 的材料成 本, 应尽可能减小 λ 。

由图 4 可知, PMFCL 的总拥有费用 W 随饱和深度比 K_s 的增大而降低, 随电感比 λ 的增大而升高。 当 K_s 取值较小时, W 随电感比 λ 的增大基本呈线 性增长; 当 K_s 取值较大时, λ 取值对 W 的影响很小。 因此, 为了降低 PMFCL 的总拥有费用, 应尽可能地



图 3 W_x 随 K_s 、 λ 的变化曲线

Fig.3 Variation curves of $W_{\rm x}$ vs. $K_{\rm s}$ and λ



Fig.4 Variation curves of W vs. K_s and λ

减小 λ ,并合理增大 K_{so}

2.3 PMFCL 经济性优化

针对高压大容量 PMFCL 的经济性优化,需考虑 以下几个问题。

(1) PMFCL 作为串联设备,应尽量减小其对系 统正常运行的影响,在保证限流能力的前提下,应确 保其工作压降小于线路额定压降的 5%^[7]。在本实 例中,结合前面计算所得电感和变量 ρ 的大小以及 电感比变量 λ 的定义,可初步得到 λ 的取值范围为 $\lambda \ge 0.43$ 。

(2) i_{min} 是使 PMFCL 由低阻抗切换到高阻抗,即 启动限流的重要阈值。若 i_{min} 过小且接近额定电流, 可能发生误动现象;若 i_{min} 过大且接近系统短路电 流,则可能发生拒动现象,应确保既不拒动且不误 动。综合考虑系统额定负荷电流和预期短路电流, 设定 i_{min} 的取值范围为 5 kA $\leq i_{min} \leq 10$ kA。

(3)考虑软磁铁芯的制造工艺和装配难易程度,要求铁芯等效磁路长度 *l*。不超过 25 m。

(4)考虑软磁铁芯、永磁体和交流绕组的尺寸 配合问题,要求软磁铁芯长度 *l*_e/2 大于永磁体宽度 与交流绕组高度 *h*_e之和,并留有一定的裕度。

以单相半波 PMFCL 的材料成本 W_x和总拥有费用 W 最小作为目标函数:

$$F_1 = \min W_x \tag{30}$$

$$F_2 = \min W \tag{31}$$

并得到 PMFCL 的经济性优化边界条件为:

$$\lambda \ge 0.43 \tag{32}$$

$$5 \text{ kA} \leq i_{\min} \leq 10 \text{ kA} \tag{33}$$

 $l_e \leq 25 \text{ m} \tag{34}$

$$2\frac{S_{\rm m}}{\sqrt{S}} + h_{\rm c} \le \frac{l_{\rm e}}{2} \times 95\% \tag{35}$$

根据上述目标函数和边界条件,对 PMFCL 进行 经济性优化。计算结果显示,有效材料成本和总拥 有费用的最优解均在 K_s =7.95%、 λ =3时取得。优化 计算结果及对应的拓扑结构参数如表 3 所示。

表 3 单相半波 PMFCL 的经济性优化计算结果

Table 3 Results of economic optimization for single-phase half-wave PMFCL

λ	$K_{\rm s}/\%$	成本最优解/万元		结构参数				
		$W_{\rm x}$	W_{y}	W	$l_{\rm m}/{\rm m}$	$S_{\rm m}$ / ${\rm m}^2$	$l_{\rm e}/{\rm m}$	$S_{\rm e}/{ m m}^2$
3	7.95	1274.3	10557.7	11832	2.234	3.569	15.44	2.312

由表 3 可知,运行成本 W,约为材料成本 W,的 8.3 倍,说明与材料成本相比,运行成本在 PMFCL 有 效寿命周期总成本中占据更大的比重。因此,PMFCL 经济性分析和优化必须考虑运行成本。

需要指出的是,前述经济性分析模型和研究实 例都是针对单相半波 PMFCL 的。因此,一台额定电 压为 500 kV、额定电流为 2 kA,可将系统短路电流 从 51 kA 限制到 20 kA 的三相全波 PMFCL 的材料成 本只需 $6W_x$ =7645.8 万元,而华东电网 500 kV 限流 器示范工程的材料成本约为 20000 万元。本文计算 的运行成本 W_y 为 PMFCL 运行 20 a 产生的总损耗 所对应的费用,由于投运时间较短,相应数据在华东 电网限流器示范工程中尚未体现。然而,仅从材料 成本来看,PMFCL 在高压大容量应用场合具有更好 的经济性优势。

2.4 仿真分析

为验证上述经济性优化计算结果的合理性,要求按表 3 所示结构参数设计的 PMFCL 满足以下条件:可将短路电流有效值由 51 kA 限制到 20 kA,即满足限流性能;绕组电流为零,仅永磁体偏置磁场作用时,铁芯应处在深度饱和区,即满足 K_s=7.95%;短路电流峰值时,绕组磁场不应使铁芯进入反向饱和区,以免 PMFCL 失去限流能力。

基于 Ansoft Maxwell 软件,建立了单相半波直 线式 PMFCL 的二维有限元分析模型,该半波拓扑用 来限制短路电流正半波,如图 5 所示。2 块永磁体 的磁动势方向一致,绕组 1 与绕组 2 同相串联,绕组



图 5 直线式 PMFCL 有限元模型图 Fig.5 Finite element model of straight-line PMFCL

电流由外部电路控制。

经有限元求解计算,可得串入 PMFCL 前后的系 统短路电流波形如图 6 所示。PMFCL 使系统短路 电流正半波有效值由 51 kA 降为 25 kA 左右,虽然 比预期限流目标 20 kA 略高(推测是优化设计过程 中未考虑漏磁效应而导致的),但基本能满足限流性 能要求。对于短路电流负半波而言,PMFCL 铁芯虽 处于深度饱和状态,但限流绕组同样具有一定的等 效阻抗,只不过与正半波非饱和状态的等效阻抗相 比要小得多,因此 PMFCL 使短路电流负半波也会有 一定程度的下降,不过远小于正半波的下降幅度。





限流绕组电流为零,即只有永磁体偏置磁场作 用时,PMFCL模型中折线 *ABCDE*(见图 5)所示位置 的磁感应强度和 PMFCL 的磁场分布分别如图 7 和 图 8 所示。可知,在永磁体偏置磁场作用下,铁芯在 *AB* 段的磁感应强度达 1.75 T,饱和深度比与优化计 算要求值 7.95% 基本一致。



图 7 绕组电流为零时折线 ABCDE 处的磁感应强度 Fig.7 Curve of magnetic induction intensity vs. fold-line ABCDE when winding current is zero





图 9 和图 10 分别为短路电流第一个半波峰值 时折线 ABCDE 处的磁感应强度和 PMFCL 的磁场 分布。可知,大短路电流使绕组产生的磁场足以抵 消永磁体的偏置磁场,反向磁感应强度约为 1.6 T,虽 接近反向饱和磁感应强度,但 PMFCL 不会进入反向



图 9 短路电流第一个半波峰值时折线 ABCDE 处的 磁感应强度





图 10 短路电流第一个半波峰值时 PMFCL 磁场分布图 Fig.10 Magnetic-field distribution of PMFCL when short circuit current reaches first half-wave peak

饱和区而失去限流能力。

需要指出的是,当绕组电流产生的磁场与永磁体偏置磁场方向相反,尤其是绕组电流较大,如短路电流第一个半波峰值时,PMFCL外侧漏磁通很严重(见图 10),下一步可从漏磁建模、如何计及漏磁影响和减少漏磁等方面对 PMFCL 的经济性优化设计算法进行完善。

通过对比串入 PMFCL 前后的系统短路电流,分 析绕组电流为零时刻、短路电流第一个半波峰值时 刻折线 ABCDE 所示位置的磁感应强度以及 PMFCL 磁场分布图,使本文 PMFCL 经济性优化模型的合理 性和有效性得到了验证,仿真结果基本满足 PMFCL 的预期设计要求。

3 结论

(1)构建了直线式 PMFCL 的经济性分析模型, 将其总拥有费用定义为材料成本与运行成本之和。 其中,材料成本与关键结构参数 *l*_m,*l*_e,*S*_m和 *S*_e有关; 而运行成本与 *l*_e和 *S*_e密切相关。

(2)采用电感和ρ、电感比λ及饱和深度比K_s 3个独立电磁变量分别表征 PMFCL 的短路电流限 制能力、铁芯在正向饱和态和不饱和态之间的转换 能力以及永磁体对铁芯的磁偏置能力。指出了 PMFCL 的经济性优化可转化为这 3 个独立电磁变 量的优化组合问题。

(3) 建立了 500 kV PMFCL 经济性分析实例,并在 电感和 ρ 一定的基础上,分析得出了电感比 λ 、饱和 深度比 K_s 对材料成本 W_x 和总拥有费用W的影响规 律。可知,为了降低 PMFCL 成本,应尽可能减小 λ 。

80

(4) 以材料成本 W_x和总拥有费用 W 最小作为 目标函数,并选取经济性优化边界条件,得到了 PMFCL 的经济最优设计方案。分析可知,与材料成 本相比,运行成本在 PMFCL 总拥有费用中占据更大 的比重。与华东电网限流器示范工程的材料成本相 比,直线式 PMFCL 在高压大容量场合具有更好的经 济性优势。

(5) 依据经济性分析实例的优化计算结果,基于 Ansoft Maxwell 软件建立了 PMFCL 二维有限元模型,仿真结果基本满足预期设计要求,证明了经济性 优化模型的有效性和合理性。

参考文献:

[1] 张志丰,肖立业,邱清泉,等. 一种改进串联谐振型限流器[J]. 电 工技术学报,2015,30(6):170-177.

ZHANG Zhifeng,XIAO Liye,QIU Qingquan, et al. An improved series-resonant type fault current limiter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2015,30(6):170-177.

[2]郑健超.故障电流限制器发展现状与应用前景[J].中国电机工 程学报,2014,34(29):5141-5147.

ZHENG Jianchao. Current status and application prospect of fault current limiters[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(29): 5141-5147.

[3] 张晚英,胡雪峰,周慧,等.改进型饱和铁心高温超导限流器的实验研究[J]. 电工技术学报,2014,29(11):170-176.

ZHANG Wanying, HU Xuefeng, ZHOU Hui, et al. Experimental research on an improved saturated core high temperature superconducting fault current limiter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(11):170-176.

- [4] 邹亮,李庆民,刘洪顺,等. 磁性材料在永磁饱和型故障限流器中的应用[J]. 电气应用,2008,27(14):52-56.
 ZOU Liang,LI Qingmin,LIU Hongshun,et al. Application of magnetic materials in permanent magnet-biased saturated iron core fault current limiter[J]. Electrotechnical Application,2008,27 (14):52-56.
- [5] SANTA T, CHKRABORTY A K, ROY D, et al. Analysis of passive magnetic fault current limiter using wavelet transform [C] // International Conference on Power Systems (ICPS'09). Kharagpur, India: IEEE, 2009:1-6.
- [6] KNOTT J C, MOSCROP J W. Increasing energy efficiency of saturated-core fault current limiters with permanent magnets [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2013, 49(7):4132-4136.
- [7] MUKHOPADHYAY S C,DAWSON F P,IWAHARA M,et al. Analysis,design and experimental results for a passive current limiting device[J]. IEE Proceedings-Electric Power Applications, 1999,146(3):309-316.
- [8] IWDARA M, MUKHIOPADHYAY S C, YANIADA S, et al. Development of passive fault current limiter in parallel biasing mode[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1999, 35(3): 3523-3525.
- [9] CHONGE E, RASOLONJANAHARY J L, STURGESS J, et al. A

novel concept for a fault current limiter [C] // The 8th IEE International Conference on AC and DC Power Transmission. London, UK: IEEE, 2006:251-255.

- [10] RASOLONJANAHARY J-L,STURGESS J P,CHONG E F H,et al. Design and construction of a magnetic fault current limiter [C]// The 3rd IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives. Dublin, Ireland: IEEE, 2006:681-685.
- [11] 邹亮,李庆民,刘洪顺,等. 永磁饱和型故障限流器的大容量化 可行性研究[J]. 高电压技术,2009,35(10):2568-2574.
 ZOU Liang,LI Qingmin,LIU Hongshun, et al. Feasibility analysis on developing high voltage and large capacity permanent-mangnet-biased fault current limiter[J]. High Voltage Engineering,2009,35(10):2568-2574.
- [12] 邹亮,李庆民,刘洪顺,等.大容量永磁饱和型故障限流器参数 设计与优化[J].中国电机工程学报,2011,31(9):105-112.
 ZOU Liang,LI Qingmin,LIU Hongshun, et al. Parameter design and optimization methodology for large capacity applications of permanent-magnet-biased saturation based fault current limiter [J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(9):105-112.
- [13] 邹亮,李庆民,许家响,等.考虑漏磁效应的永磁饱和型故障限 流器磁路建模与实验研究[J].中国电机工程学报,2012,32
 (21):137-145.

ZOU Liang,LI Qingmin,XU Jiaxiang,et al. Magnetic topology modeling and experimental study of permanent-magnet-biased saturation based fault current limiter with leakage flux effect [J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(21):137-145.

- [14] 王金丽. 有载调容变压器综合经济性分析及应用研究[J]. 高压 电器,2009,45(3):32-35.
 WANG Jinli. Application and integrated economic analysis of on-load capacity regulating transformer[J]. High Voltage Apparatus,2009,45(3):32-35.
- [15] GEORGILAKIS P S, AMOIRALIS E I. Distribution transformer cost evaluation methodology incorporating environmental cost
 [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2010, 4 (7): 861-872.
- [16] BERTOTTI G. General properties of power losses in soft ferromagnetic materials[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1988,24(1):621-630.
- [17] 崔杨,胡虔生,黄允凯. 任意频率正弦波条件下铁磁材料损耗计算[J]. 微电机,2007,40(8):1-3.
 CUI Yang,HU Qiansheng,HUANG Yunkai. Iron loss prediction in ferromagnetic materials with sinusoidal supply[J]. Micromotors,2007,40(8):1-3.
- [18]《变压器手册》编写组. 电力变压器手册[M]. 沈阳:辽宁科学技 术出版社,1990:518-519.
- [19] 谢毓城. 电力变压器手册[M]. 北京:机械工业出版社,2003:88-90.
- [20] 王华昕,蓝元良,汤广福. 限流器晶闸管阀自触发保护动作电压
 阈值设计[J]. 高电压技术,2011,37(7):1811-1816.
 WANG Huaxi,LAN Yuanliang,TANG Guangfu. Design on thyristor self-trigger protection action voltage threshold of series resonance fault current limiter[J]. High Voltage Engineering,

2011,37(7):1811-1816.

82

[21] 杨国庆,祝瑞金,余颖辉,等. 华东电网 500 kV 故障电流限制器 应用研究[J]. 华东电力,2008,36(11):22-25.

YANG Guoqing,ZHU Ruijin,YU Yinghui,et al. Application of fault current limiters to 500 kV grids in east China[J]. East China Electric Power,2008,36(11):22-25.

- [22] 季方,钱锋. 瓶窑变超高压电网故障电流限制器示范工程设备 布置方案研究[J]. 华东电力,2011,39(4):597-599.
 JI Fang,QIAN Feng. Equipment layout of EHV grid fault current limiter demonstration project at Pingyao substation[J].
- [23] JIN Xuefen, DAI Chaobo, JI Ping, et al. Research of fault current limiter for 500 kV power grid [C] // International Conference on Power System Technology (POWERCON). Hangzhou,

East China Electric Power, 2011, 39(4): 597-599.

China: IEEE, 2010: 1-10.

作者简介:



邹 亮

邹 亮(1983—),男,山东菜芜人,副教 授,博士,主要研究方向为电力系统经济型 故障限流技术、应用电磁学(E-mail:zouliang@ sdu.edu.cn);

伍珈乐(1994—),女,广西桂林人,硕士 研究生,主要研究方向为电力系统经济型故障 限流技术(**E-mail**:18253165323@163.com);

刘 涛(1990-),男,山东滨州人,博士

研究生,主要研究方向为电力系统经济型故障限流技术 (E-mail:ltxingyu@126.com)。

Economic analysis and optimization of large-capacity permanent-magnet-biased fault current limiter

ZOU Liang¹, WU Jiale¹, LIU Tao², ZHAO Tong¹, ZHANG Li¹

(1. Shandong Provincial Key Lab of UHV Transmission Technology and Equipment, Shandong University, Ji'nan

250061, China; 2. State Key Lab of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,

North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: An economic analysis model of PMFCL(Permanent-Magnet-biased Fault Current Limiter) is established, which includes material cost and operational cost. The material cost is determined by the pivotal structural parameters of PMFCL. The functional relationship among its four structural parameters and three independent electromagnetic variables, i.e. inductance sum, inductance ratio and saturation depth ratio, is deduced based on the equivalent magnetic circuit method. The operational cost is composed of core loss and winding loss. Their calculation methods are given respectively. With a 500 kV PMFCL as an economic analysis example, the influence of electromagnetic variables on the economic performance of PMFCL is analyzed and its economic optimization model is established to calculate its optimal cost and corresponding structural parameters. Results show that the PMFCL possesses better economic advantages in the application conditions of high voltage and large capacity. The two-dimensional finite element simulation with Ansoft Maxwell software proves the rationality of the economic optimization model.

Key words: permanent-magnet-biased fault-current limiter; economic analysis; optimization; material cost; operational cost; electromagnetic variable; equivalent magnetic circuit method