



CRAFT 超导磁体电源换流变压器短路阻抗设计

黄荣林^{1,2}, 傅 鹏^{1,2}, 黄连生^{1,2}, 许留伟^{1,2}, 高 格^{1,2}, 何诗英¹

(1. 中国科学院 等离子体物理研究所, 合肥 230031; 2. 中国科学技术大学, 合肥 230036)

摘 要: 聚变堆主机关键系统综合研究设施(CRAFT)超导磁体电源兼具大电流稳态运行、高功率脉冲运行和瞬态故障抑制能力的需求。换流变压器的短路阻抗与超导磁体电源的特性密切相关。为了优化超导磁体电源的性能,基于交直流系统的参数和换流变压器的等效电路模型,研究了换流变压器短路阻抗与超导磁体电源的输出电压、谐波电流、短路故障电流和无功损耗的关系。短路阻抗越小,超导磁体电源的额定输出电压越高,无功损耗越小,这些特性对CRAFT超导磁体电源的性能有利,但是短路故障电流和谐波电流增加,影响电源的短路故障抑制能力和谐波特性。在CRAFT超导磁体电源换流变压器短路阻抗设计时,首先短路阻抗必须满足直流电源的额定输出电压和故障电流抑制能力,其次,由于CRAFT超导磁体电源是多相变流器,仅产生高次特征谐波电流,含量少便于抑制,因而尽量选择较小的短路阻抗。

关键词: 聚变堆主机关键系统综合研究设施; 电源; 短路阻抗; 谐波电流; 无功功率

中图分类号: TL6

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202133.210088

Short-circuit impedance design for converter transformer of superconducting magnet power supply for CRAFT

Huang Ronglin^{1,2}, Fu Peng^{1,2}, Huang Liansheng^{1,2}, Xu Liuwei^{1,2}, Gao Ge^{1,2}, He Shiyong¹

(1. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: The superconducting magnet power supply for the Comprehensive Research Facility for Fusion Technology (CRAFT) has the abilities of large current steady-state operation, high power pulse operation and transient fault suppression, which is closely related to the short circuit impedance of converter transformer. On the basis of parameters of AC system and equivalent circuit model of converter transformer, the relationship between the performance of superconducting magnet power supply and the short circuit impedance of converter transformer is studied. The research shows that the small short circuit impedance is beneficial to the output voltage and the reactive power loss of superconducting magnet power supply, but the short-circuit fault current and harmonic current increase accordingly. For short-circuit impedance design for converter transformer purposes, firstly, short-circuit impedance must satisfy the transient fault suppression capability and the rated output voltage, and secondly, it is easy to suppress the high characteristic harmonic current brought by thyristor multi-phase converter for CRAFT, hence small short-circuit impedance should be chosen.

Key words: CRAFT; power supply; short-circuit impedance; harmonic current; reactive power

随着不可再生能源的日益枯竭和生态环境的不断破坏,核聚变能具有储量丰富和清洁无污染的优点得到了广泛的研究^[1-2]。通过几十年的核聚变装置建设和实验研究,我国在磁约束核聚变领域逐渐赶上了世界先进水平^[3-5]。目前,我国已经开始设计中国工程实验堆(CFETR)。而聚变堆主机关键系统综合研究设施(CRAFT)项目的建设,正是为了加快CFETR的工程设计及其关键设备的实验测试^[6-8]。CRAFT超导磁体电源是CRAFT项目的核心子系

* 收稿日期:2021-03-17; 修订日期:2021-07-24

基金项目:聚变堆主机关键系统综合研究设施项目(2018-000052-73-01-001228)

联系方式:黄荣林, hronglin@163.com。

通信作者:黄连生, huangls@ipp.ac.cn。

统,具备对 CFETR 关键设备的型式试验和额定参数测试的能力。换流变压器为超导磁体电源的重要组成部分,其短路阻抗的设计,对超导磁体电源的性能和安全运行具有重要意义。

针对换流变压器短路阻抗的设计,文献[9]研究了变压器短路阻抗与变压器的动稳定性、制造成本、电压调整率以及无功补偿容量关系;文献[10]总结出变流器的故障电流水平是短路阻抗的选择依据;文献[11-12]根据换流站整流和逆变两端系统的设计要求,计算换流变压器的基本参数。上述短路阻抗的设计分析主要集中于变压器自身的特性和故障电流抑制能力。本文从交直流系统的角度,研究换流变压器短路阻抗与交直流供电系统性能的关系,获得 CRAFT 超导磁体电源换流变压器短路阻抗的设计约束条件和设计结果。

1 CRAFT 超导磁体电源

1.1 超导磁体电源的设计参数

根据超导磁体研究系统的建设目标,超导磁体电源的工作模式有稳态运行和脉冲运行两种工作模式,直流电源的设计参数见表1所示。

表 1 超导磁体电源系统基本参数和性能指标

Table 1 Design parameters and performance of the power supply

rated voltage/V	rated power/MW	rated voltage/kV	rated current/kA	maximum output pulse current/kA	pulse width/ms
250	30	0.25	120	400	200

1.2 超导磁体电源的系统结构

超导磁体电源是由四台六脉波晶闸管变流桥组成的多相变流系统。四台变流桥单元通过降压主变接入合环电网,接入口短路容量为 1270 MV·A,接入点电网电压 110 kV。降压主变将 110 kV 交流电压降压至 35 kV 向四台移相换流变压器供电,四台换流变压器原边均采用延边三角形接法实现副边电压移相,电源系统结构如图 1 所示。

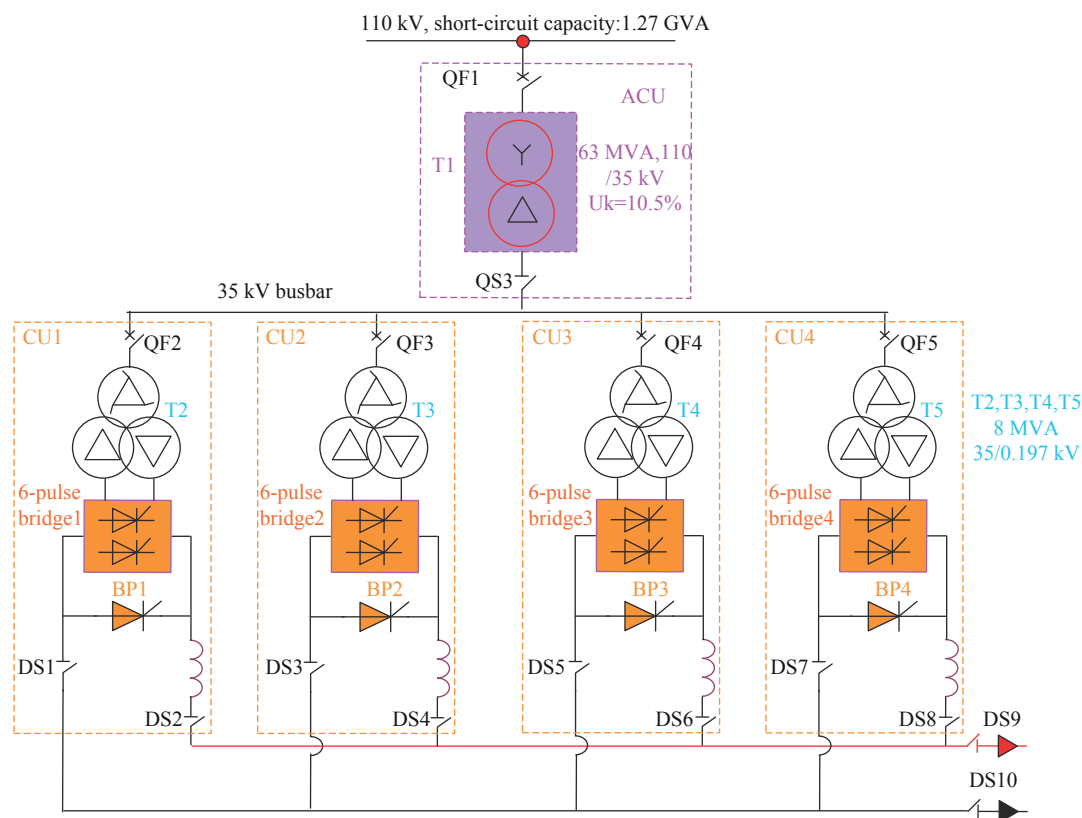


Fig. 1 Simplified diagram of power supply system

图 1 超导磁体电源系统图

图 1 中主要交流供电设备的电气参数在表 2 中列出。依据交流系统阻抗的换算关系,交流阻抗折算到换流变压器副边参考电压的等效阻抗在表 3 中列出。

表 2 主要设备的电气参数

Table 2 Electrical parameters of main equipments

parameter	rated voltage/kV	short-circuit capacity/MVA	rated power/MW	transformer ratio	short-circuit impedance	load loss/kW	resistance/mΩ	inductance/mΩ
power grid	110	1270	—	—	—	—	—	—
step-down transformer	—	—	63	110/35	10.5%	232	—	—
power cable	—	—	—	—	—	—	239.4	110.6
converter transformer	—	—	8	35/0.197	—	46	—	—
AC busbar	—	—	—	—	—	—	—	0.314

表 3 主要设备的等效阻抗

Table 3 Equivalent impedance of main equipments

parameters	equivalent reactance/μΩ	equivalent resistance/μΩ
power grid	30.6	3.1
step-down transformer	65	2.3
power cable	3.5	7.6
converter transformer	—	27.9
AC busbar	314	0

2 换流变压器短路阻抗优化设计

换流变压器是超导磁体电源系统中主要的电气设备,电源系统的故障电流、直流输出电压、电流谐波、和无功损耗与换流变压器的短路阻抗密切相关。

2.1 短路阻抗与变流器电源输出电压的关系

晶闸管变流器通过控制晶闸管触发导通的相对时刻实现直流电能的调节。由于换流变压器的副边电压畸变而不易提取,因而同步电压会选择换流变压器的原边电压。这就导致了由变压器短路阻抗引起的同步电压相移,它直接影响变流器的输出电压。超导磁体研究电源的三相桥变流电路输入电压

$$\begin{cases} e_a = 160.9 \sin(\omega t) \\ e_b = 160.9 \sin(\omega t - 120^\circ) \\ e_c = 160.9 \sin(\omega t + 120^\circ) \end{cases} \quad (1)$$

式中: e_a 、 e_b 和 e_c 为三相输入电压; ω 为角频率。对于大电感负载,如果忽略换相过程和电流脉动,阀侧交流电流为正负半周各为 120° 、幅值为 I_d 的方波,三相电流波形相同,依次相差 120° 。触发角为 α 时的阀侧交流电压和电流波形如图 2 所示。由图 2 可知,阀侧基波电流 I_2 滞后阀侧基波电压相位正好为 α 。

为了进一步计算同步相移 φ ,将换流变原边阻抗电压等效到副边,获得单桥变流器的等效电路图 3 所示。图 3 中, r_1 和 r_2 分别是换流变原副边等效电阻, x_1 和 x_2 分别是换流变原副边等效电抗。

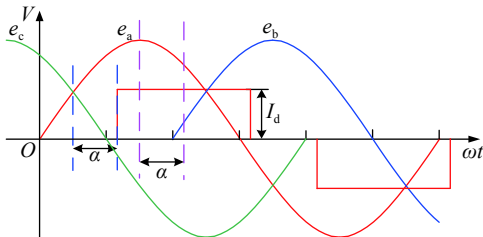


Fig. 2 Phase current waveform of valve-side of converter transformer with the firing angle α

图 2 三相桥变流器触发角 α 时阀侧交流电流波形

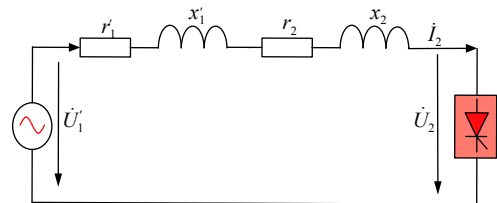


Fig. 3 Equivalent circuit of synchronous phase shifting for converter

图 3 三变流器同步相移计算等效电路

根据图 3 等效电路,可得如下相量关系

$$\dot{U}'_1 = \dot{U}_2 + \dot{I}_2(r'_1 + x'_1 + r_2 + x_2) \quad (2)$$

在实际的变压器中, $(r'_1 + r_2) \ll (x'_1 + x_2)$, 因此变压器的短路阻抗可近似为 $X_B = (x'_1 + x_2)$, 从而变流器输入电压 \dot{U}_2 总是滞后于换流变压器原边电压, 相量关系如图 4 所示。由此得到同步相移

$$\varphi = \arcsin\left(\frac{I_2 X_B}{U'_1} \cos \alpha\right) \quad (3)$$

由超导磁体电源的额定参数, 换流变压器的额定容量 $8 \text{ MV}\cdot\text{A}$, 额定电压 197 V 。当变压器短路电压百分比为 $u_k\%$, 三相桥变流器的额定输出直流电流 30 kA 时, 可计算短路阻抗 X_B 和同步相位移 φ

$$X_B = u_k \% \frac{U_{21}^2}{S_N} = 0.048 5 u_k \times 10^{-3} \quad (4)$$

$$\varphi = \sin^{-1}\left(\frac{0.048 5 u_k \times \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \times 30}{197} \cos \alpha\right) = \sin^{-1}(0.01 u_k \cos \alpha) \quad (5)$$

当变流器额定输出电流 30 kA , 同时考虑换相重叠引起的直流压降, 其最高直流输出电压 $V_{d\max}$ 可以按式(6)计算

$$V_{d\max} = 1.35 V_1 \cos \varphi - \frac{3 X_B}{\pi} I_d = 265.95 \cos(\sin^{-1}(0.01 u_k)) - 1.39 u_k \quad (6)$$

进一步可以得到 $V_{d\max}$ 与 u_k 的关系曲线如图 5 所示。由图 5 可知, 变流器最高输出直流电压随短路阻抗增加而迅速减小。

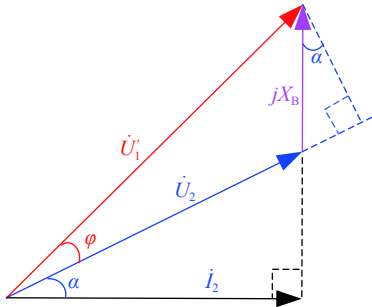


Fig. 4 Phasor diagram of converter system
图 4 变流系统相量关系图

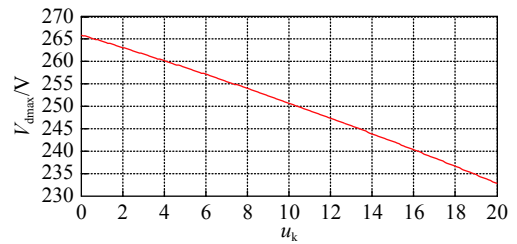


Fig. 5 Relation between maximum output voltage $V_{d\max}$ and short circuit impedance u_k of transform
图 5 变流器最高输出直流电压 $V_{d\max}$ 与短路阻抗 u_k 的关系

2.2 短路阻抗与变流器电源谐波电流的关系

由于换流变压器短路阻抗的存在, 变流器的换相不能瞬间完成。换相期间三相同同时导通的重叠角用 γ 表示。换相期间的等效电路如图 6 所示。

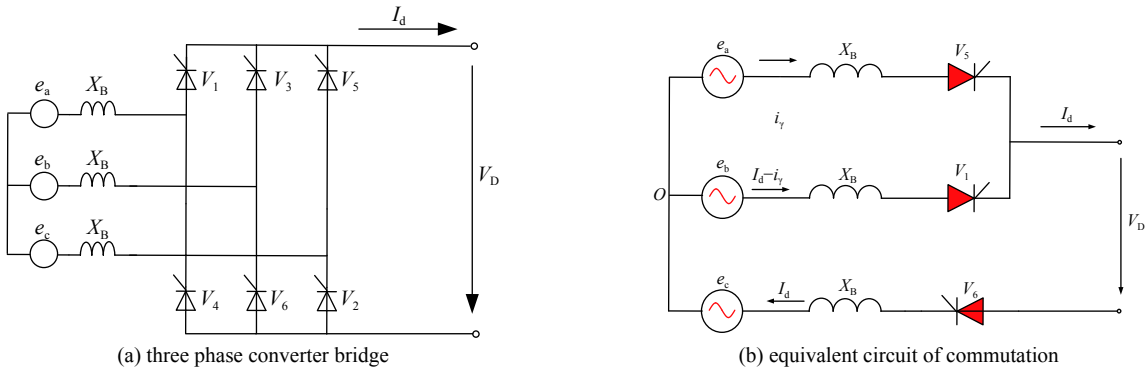


Fig. 6 Equivalent circuit of transferring from V_5 to V_1
图 6 V_5 向 V_1 换相的等效电路

在 $\omega t = 30^\circ + \alpha$ 时刻, V_5 开始向 V_1 换相, V_5 与 V_1 同时导通, A 相流过换相电流 i_y , i_y 按下式计算

$$\begin{cases} L_B \frac{di_y}{dt} - L_B \frac{d(I_d - i_y)}{dt} = e_a - e_c \\ i_y \left(\frac{\pi}{6} + \alpha\right) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中代入系统参数,进一步可以计算换相期间 A 相电流

$$i_A(\omega t) = \frac{197}{X_B} [\cos \alpha - \cos(\omega t - 30^\circ)] = \frac{4063}{u_k} [\cos \alpha - \cos(\omega t - 30^\circ)] \quad (8)$$

$\omega t = 30^\circ + \alpha + \gamma$ 时刻,换相结束,A相电流等于电流 I_d 。此后,A相流保持为 I_d 不变,直到阀 V_1 向 V_3 换相。同理可得方程

$$\begin{cases} L_B \frac{d(I_d - i_\gamma)}{dt} - L_B \frac{di_\gamma}{dt} = e_a - e_b \\ i_\gamma \left(\frac{\pi}{6} + \alpha + \frac{2\pi}{3} + \gamma \right) = 0 \end{cases} \quad (9)$$

进一步可以计算换相期间 A 相电流

$$i_A = \frac{4063}{u_k} \left[\cos \left(\omega t - \frac{5\pi}{6} \right) - \cos(\alpha + \gamma) \right] \quad (10)$$

由上面的分析可以得到 A 相流 i_A 在正半周的函数

$$i_A(\omega t) = \begin{cases} \frac{4063}{u_k} \left[\cos \alpha - \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{6} \right) \right], & \omega t \in \left(\frac{\pi}{6} + \alpha, \frac{\pi}{6} + \alpha + \gamma \right) \\ I_d, & \omega t \in \left(\frac{\pi}{6} + \alpha + \gamma, \frac{5\pi}{6} + \alpha \right) \\ \frac{4063}{u_k} \left[\cos \left(\omega t - \frac{5\pi}{6} \right) - \cos(\alpha + \gamma) \right], & \omega t \in \left(\frac{5\pi}{6} + \alpha, \frac{5\pi}{6} + \alpha + \gamma \right) \\ 0, & \omega t \in \left(\frac{5\pi}{6} + \alpha + \gamma, \frac{7\pi}{6} + \alpha \right) \end{cases} \quad (11)$$

A 相电流 i_A 在负半周函数表达式可由(12)给出

$$i_A(\omega t + \pi) = -i_A(\omega t) \quad (12)$$

A 相电流 i_A 在一个周期内的波形,如图 7 所示。

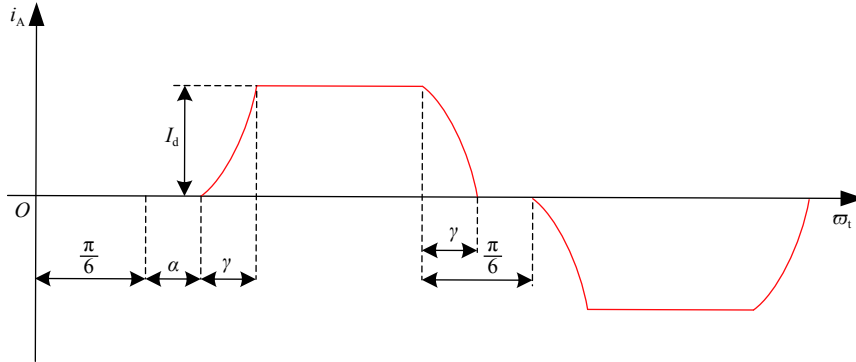


Fig. 7 A-phase current waveform of three phase bridge converter

图 7 三相桥变流器交流侧 A 相电流波形

对其电流波形进行傅里叶分解,得到 A 相电流中基波电流的有效值

$$I_1 = \frac{\sqrt{6}I_d}{2\pi} \frac{[\sin^2 \gamma - 2\gamma \sin \gamma \cos(2\alpha + \gamma) + \gamma^2]^{\frac{1}{2}}}{\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma)} \quad (13)$$

根据 A 相电流波形图 8 和函数表达式(13),可计算 A 相电流有效值

$$I_A = \sqrt{\frac{2}{3}} I_d \sqrt{1 - 3 \frac{\sin \gamma [2 + \cos(2\alpha + \gamma)] - \gamma [1 + 2 \cos \alpha \cos(\alpha + \gamma)]}{2\pi [\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma)]^2}} \quad (14)$$

由式(13)和(14)可计算输入谐波电流百分比

$$I_H \% = \frac{\sqrt{I_A^2 - I_1^2}}{I_A} \times 100\% \quad (15)$$

当电源以触发角 α 为 0° 的额定功率运行时, 谐波电流百分比可以进一步化简为

$$I_H\% = \sqrt{1 - \frac{9}{2\pi} \frac{\sin^2\gamma - 2\gamma\sin\gamma\cos\gamma + \gamma^2}{2\pi(1 - \cos\gamma)^2 - 3[\sin\gamma(2 + \cos\gamma) - \gamma(1 + 2\cos\gamma)]}} \quad (16)$$

式中: I_H 为谐波电流有效值。换相重叠角 γ 计算如下

$$\gamma = -\alpha + \cos^{-1}(\cos\alpha - 0.0124X_B I_d) = \cos^{-1}(1 - 0.018u_k) \quad (17)$$

输入电流谐波电流百分比 $I_H\%$ 与变压器短路阻抗的关系曲线如图 8 所示, 当 $u_k=0$ 时, 交流电源的谐波电流占总电流的 28.8%; 当 $u_k=20$ 时, 交流电源的谐波电流仅占总电流的 11.8%, 谐波电流随着短路阻抗的增加而减小。

2.3 短路阻抗与电源短路故障电流的关系

变流器短路故障形式如图 9 所示。短路故障会导致换流阀中产生冲击电流, 冲击电流的幅值和上升速率与换流变压器的短路阻抗 u_k 有关。

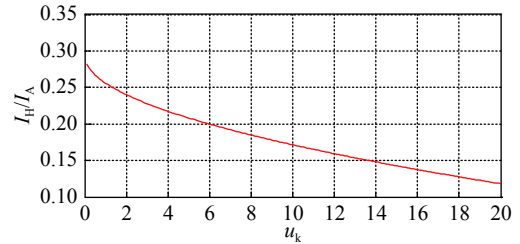


Fig. 8 Relation between harmonic current and short circuit impedance u_k of transform

图 8 谐波电流百分比与变压器短路阻抗 u_k 的关系曲线

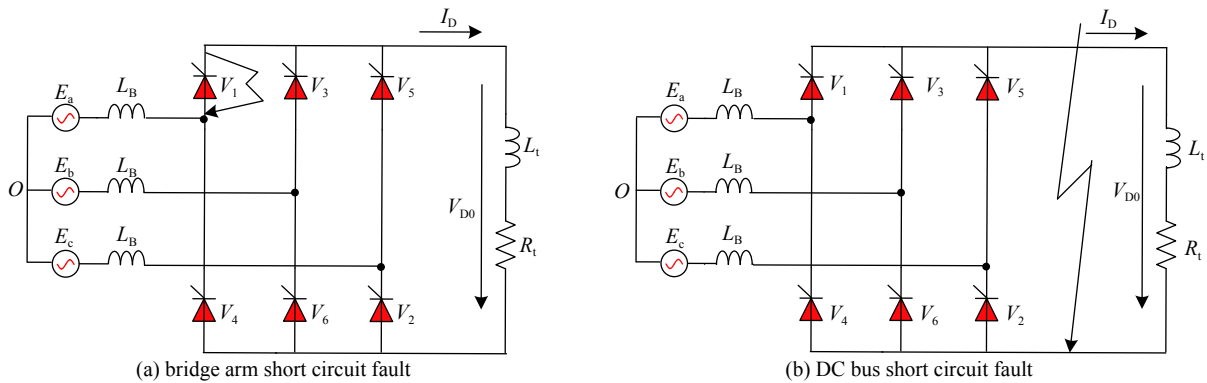


Fig. 9 Short-circuit fault diagram of converter

图 9 变流器短路故障示意图

V_1 损坏致使桥臂短路, 会造成交流两相与三相交替短路状态。交流两相短路电流与三相短路电流的幅值分别为

$$\begin{cases} I_{s2} = \frac{\sqrt{2} \times 197}{2\omega L_B} = \frac{0.444}{L_B} \\ I_{s3} = \frac{\sqrt{2} \times 197}{\sqrt{3}\omega L_B} = \frac{0.512}{L_B} \end{cases} \quad (18)$$

式中: I_{s2} 、 I_{s3} 分别是两相短路和三相短路电流幅值, L_B 是交流侧等效电感, 由表 3 等效阻抗可知, 它为 $0.3059/\omega$ 与换流变压器漏电感 L_T 之和。换流变压器漏电感

$$L_T = \frac{0.524}{\omega} \times u_k\% \times \frac{V_{D0}}{I_{DN}} = 0.148u_k \quad (19)$$

因而, 交流侧等效电感

$$L_B = \frac{3.5995}{\omega} + 0.148u_k = 11.5 + 0.148u_k \quad (20)$$

进一步, 可以得到两相短路和三相短路电流的幅值与短路阻抗的关系式为

$$\begin{cases} I_{s2} = \frac{0.444}{L_B} = \frac{444}{11.5 + 0.148u_k} \\ I_{s3} = \frac{0.512}{L_B} = \frac{512}{11.5 + 0.148u_k} \end{cases} \quad (21)$$

桥臂短路时, 换流阀最大的短路冲击电流幅值

$$I_{sa} = 2.299I_{s3} = \frac{1177}{11.5 + 0.148u_k} \quad (22)$$

2.4 短路阻抗与变流器电源无功消耗的关系

变流器电源运行时会消耗无功功率,其中变流器和换流变压器是消耗无功功率的两大主要设备。变流器从交流系统吸收无功功率 Q_c 的大小取决于直流输送功率 P_d 、换相重叠角 γ 和换相电抗,即

$$\begin{cases} d_x = 0.5u_k \frac{I_d}{I_{dN}} \frac{V_{IN}}{V_1} \\ Q_c = P_d \tan[\cos^{-1}(\cos \alpha - d_x)] \end{cases} \quad (23)$$

式中: I_d 和 I_{dN} 分别为直流电流的实际值和额定值; V_{IN} 和 V_1 分别为换流变压器阀侧线电压的实际值和额定值; d_x 为直流换相压降比。当在触发角 α 为 0° 额定功率运行时,实际的移相角 $\alpha = \sin^{-1}(0.01u_k)$,额定直流功率 $P_{dN} = 7500$ kVA,所以无功功率 Q_c 可表示为

$$\begin{cases} Q_c = 7500 \tan[\cos^{-1}(\cos \alpha - 0.005u_k)] \\ \alpha = \sin^{-1}(0.01u_k) \end{cases} \quad (24)$$

变压器的无功消耗由铁损和铜损组成,可表示为

$$Q_T = \frac{I_0 S_N}{100} + \frac{u_k \% S^2 \left(\frac{V_N}{V}\right)^2}{100 S_N} \quad (25)$$

式中, Q_T 为变压器消耗的感性无功分量,kVA; I_0 为变压器的空载电流百分数,取值0.5; S_N 和 S 分别为变压器的额定容量和实际输出功率,其中 S_N 为8000 kVA; V_N 和 V 分别为变压器的额定电压和实际输出电压,kV; S 为变压器的实际输出功率,kVA。额定运行工况时,变压器的无功消耗达到最大,可表示为

$$Q_{Tmax} = \frac{0.5\% S_N}{100} + \frac{u_k \% S_N}{100} = 0.4 + 0.8u_k \quad (26)$$

变流器电源消耗的总的无功功率 Q_s 和功率因数 P_F 按式(27)和(28)计算。变流器电源消耗的总的无功功率 Q_s 随着短路阻抗 u_k 的递增而增加,变流器电源的功率因数 PF 随着短路阻抗 u_k 的递增而减小,它们的关系曲线如图10所示。

$$Q_s = Q_c + Q_{Tmax} \quad (27)$$

$$P_F = \frac{7500}{\sqrt{Q_s^2 + 7500^2}} 100\% \quad (28)$$

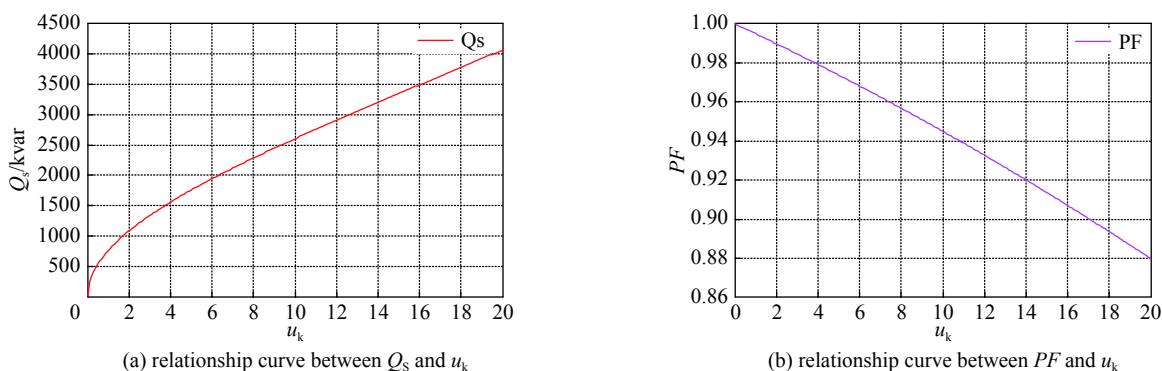


Fig. 10 Relationship curve between Q_s , PF and u_k

图10 变流器电源消耗的无功功率 Q_s 和功率因数 PF 与 u_k 关系曲线

2.5 换流变压器短路阻抗的设计

根据以上分析,在换流变压器的短路阻抗设计中,首先考虑满足直流电源额定输出电压和晶闸管开关器件的参数要求;其次,尽量减小变流器电源无功损耗和谐波电流。具体参数设计如下。

(1)变流器额定输出直流电压为250 V,根据式(6)的最高输出电压,必须要求

$$V_{dmax} = 265.95 \cos(\sin^{-1}(0.01u_k)) - 1.39u_k \geq 250 \quad (29)$$

进一步可以计算, $u_k \leq 10.5$ 。

(2) CRAFT 超导磁体电源变流器桥臂采用 6 只 5STP50Q1800 晶闸管并联结构, 5STP50Q1800 晶闸管的浪涌电流 $I_{TSM}(40 \text{ ms})$ 为 60 kA, 因而变流器电源短路故障冲击电流应小于 60 kA。根据式(22)的冲击电流可以计算每只晶闸管的冲击电流:

$$I_s = \frac{1177}{11.5 + 0.148u_k} \times \frac{1}{6} \quad (30)$$

考虑电流安全系数 1.2, 应有

$$\frac{1177}{2.46 + 0.148u_k} \times \frac{1}{6} \times 1.2 < 60 \quad (31)$$

进一步可以计算换流变压器的短路阻抗大于 9.8。

(3) 当短路阻抗百分比从 9.8% 增加到 10.5% 时, CRAFT 超导磁体电源消耗的无功功率从 2.57 kvar 增加到 2.68 kvar, 增加了 1.1 kvar; 谐波电流百分比从 16.885% 减小到 16.876%, 仅减小了 0.9%。

综合以上的约束关系和对电源特性的影响, 以及变压器的国家标准, CRAFT 超导磁体电源短路阻抗设计为 10%。

3 结 论

本文基于 CRAFT 超导磁体电源的交直流系统参数, 研究了电源的输出电压、故障电流、电流谐波和无功损耗与换流变压器短路阻抗的关系。短路阻抗减小, 超导磁体电源的额定输出电压提高, 无功损耗减小, 但是短路故障电流和谐波电流增加。基于换流变压器短路阻抗与 CRAFT 超导磁体电源特性的关系, 在满足额定直流输出电压和故障电流抑制能力的前提下, 换流变压器短路阻抗电压百分比 $u_k\%$ 设计为 10%。

参考文献:

- [1] 李存璞, 唐红安, 魏子栋. 2019年清洁能源开发热点回眸[J]. 科技导报, 2020, 38(1): 125-136. (Li Cunpu, Tang Hongan, Wei Zidong. Clean energy in 2019—A research hotspots[J]. Technology Review, 2020, 38(1): 125-136)
- [2] 杨军, 张恩昊, 郭志恒, 等. 全球核能科技前沿综述[J]. 科技导报, 2020, 38(20): 35-49. (Yang Jun, Zhang Enhao, Guo Zhiheng, et al. Recent progress of frontier nuclear energy science and technology[J]. Technology Review, 2020, 38(20): 35-49)
- [3] 李建刚. 托卡马克研究的现状及发展[J]. 物理, 2016, 45(2): 88-97. (Li Jian'gang. The status and progress of tokamak research[J]. Physics, 2016, 45(2): 88-97)
- [4] 高翔, 万元熙, 丁宁, 等. 可控核聚变科学技术前沿问题和进展[J]. 中国工程科学, 2018, 20(3): 26-31. (Gao Xiang, Wan Yuanxi, Ding Ning, et al. Frontier issues and progress of controlled nuclear fusion science and technology[J]. Strategic Study of CAE, 2018, 20(3): 26-31)
- [5] 万宝年, 徐国胜. EAST全超导托卡马克高约束稳态运行实验研究进展[J]. 中国科学, 2019, 49: 045205. (Wan Baonian, Xu Guosheng. Advances in experimental research towards high confinement and steady state operation on the experimental advanced superconducting Tokamak[J]. Science China Press, 2019, 49: 045205)
- [6] 高翔, 万宝年, 宋云涛, 等. CFETR物理与工程研究进展[J]. 中国科学, 2019, 49: 045202. (Gao Xiang, Wan Baonian, Song Yuntao. Progress on CFETR physics and engineering[J]. SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica, 2019, 49: 045202)
- [7] Wan Baonian, Ding Siye, Qian Jinping, et al. Physics design of CFETR: Determination of the device engineering parameters[J]. IEEE Trans Plasma Sci, 2014, 42(3): 495-502.
- [8] http://www.craft.ipp.ac.cn/cn/xmjj/index_25.aspx.
- [9] 屈鲁, 李格, 李华. 脉冲电网用500 kV三绕组降压变压器短路阻抗的优化[J]. 高压技术, 2014, 40(10): 3211-3227. (Qu Lu, Li Ge, Li Hua. Short-circuit impedance optimization for 500 kV three-winding step-down transformer in pulsed power electric network[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(10): 3211-3227)
- [10] 王峰, 徐政, 薛英林. 高压直流输电换流变压器参数确定方法[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(22): 98-102. (Wang Feng, Xu Zheng, Xue Yinglin. Calculation of converter transformer's parameters for HVDC transmission[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(22): 98-102)
- [11] 张友富, 黄振鹏, 向孟奇, 等. 向家坝-上海±800 kV换流变压器短路阻抗确定方法的研究[J]. 华东电力, 2011, 39(12): 2002-2006. (Zhang Youfu, Huang Zhenpeng, Xiang Mengqi, et al. Parameter selection for converter transformer short circuit impedance in Xiangjiaba-Shanghai ±800 kV UHVDC Project[J]. East China Electric Power, 2011, 39(12): 2002-2006)
- [12] 郭贤珊, 付颖. ±1100 kV特高压直流工程换流变最优短路阻抗[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 1(4): 496-503. (Guo Xianshan, Fu Ying. Study on optimal short-circuit impedance of converter transformer for ±1100 k V UHVDC[J]. Power System Protection and Control, 2018, 1(4): 496-503)