

联合试验装置 TCR 阀高电压试验方式数学模型

查鲲鹏, 温家良, 汤广福

(中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100085)

Mathematical Model Study of TCR Valve High Voltage Test Mode Based on Synthetic Test Equipment

ZHA Kun-peng, WEN Jia-liang, TANG Guang-fu

(China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100085, China)

ABSTRACT: Loss analysis is an important method for studying nonlinear thyristor systems. The paper began with the topology structure and working theory of the TCR valve high voltage test mode. Then based on the loss classifying and the loss analyzing, one mathematical model with losses is presented. The mathematical model is qualitative analyzed by Matlab, and its validity and all sidedness are verified by comparing with the EMTDC simulation results. The conclusions have an instruction role for analyzing the high power nonlinear thyristor systems.

KEY WORDS: thyristor controlled reactor valve; high voltage test mode; mathematical model; loss analysis; electromagnetic transients including DC

摘要: 损耗分析是研究含晶闸管非线性器件系统的重要手段。文中针对联合试验装置 TCR 阀高电压试验方式, 从其拓扑结构和工作原理入手, 结合该试验方式中各损耗的分类定义和损耗分析结果, 提出了一种基于损耗分析的数学模型, 并利用 Matlab 软件定性分析了数学模型的特性, 最后通过与 EMTDC 软件仿真结果的对比分析, 验证了数学模型的正确性和全面性。该文结论对含晶闸管非线性器件大容量系统的分析具有很好的指导作用。

关键词: 晶闸管控制电抗器阀; 高电压试验方式; 数学模型; 损耗分析; 含直流的电磁暂态

0 引言

现代大功率电力电子装置其核心器件大都由大功率晶闸管阀组成, 柔性交流输电(FACTS)技术和直流输电(HVDC)技术近年也得到了迅猛的发展, 这就要求建立与其相应的大功率晶闸管阀的试验手

段。目前中国电力科学研究院根据 IEC61954^[1], IEC60700^[2]等标准正在建设用于大功率电力电子阀试品(SVC 阀、TCSC 阀、STATCOM 阀和 HVDC 阀等)运行试验的联合试验装置(原理如图 1 示), 它是一种新型的大功率电力电子设备, 具有多种灵活的试验方式, 该试验装置的建成投入使用必将对电力电子技术在中国电力行业的广泛应用起到意义深远的影响。

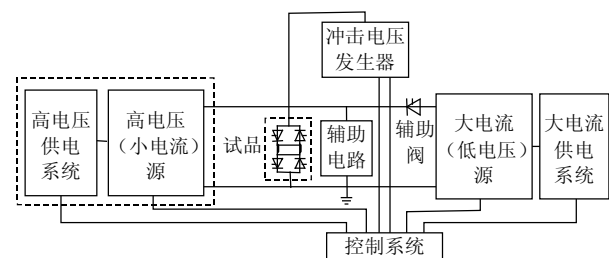


图1 联合试验装置的原理图
Fig.1 Theory diagram of STE

晶闸管控制电抗器阀(thyristor controlled reactor, TCR)阀高电压试验方式^[3-4]是联合试验装置的一种重要试验方式, 当今世界上仅有 ABB、西门子等少数几个大公司拥有该项试验能力^[5-6], 该试验方式主要用于检验阀试品耐受电压强度, 电流变化率强度和电压变化率强度的能力。

对于含有晶闸管等非线性器件的装置, 很难仅靠数学解析方法获得与实际工况相符合的解, 工程实际中对这些装置的研究都与损耗分析相结合。文献[7-10]对用于中小容量 PFC 电路、PWM 电路和 AC/DC 变流器电路的开关器件损耗作了较为详尽的分析和计算; 文献[11]和[12]分别针对 HVDC 阀和 SVC 阀进行了损耗估算方法的研究; 文献[13]利用晶闸管的宏模型分析了晶闸管的开通损耗与阻尼

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973 项目)(2004CB217907)。
The National Basic Research Program (973 Program) (2004CB217907).

电阻的关系;文献[14]基于分析高频工况下门极关断(gate turn off, GTO)晶闸管的开关损耗建立了等效传热模型,并将其用于高频工况的结温分析;文献[15]给出了飞跨电容型多电平逆变器开关损耗的计算表达式;文献[16-18]对于含晶闸管等非线性器件的装置损耗也都有研究。虽然这些文献的研究对象各不相同,但共同点是都采用了损耗分析的方法实现研究目的。

由于联合试验装置属国内首次自主开发,对其试验方式的研究工作也处于起步阶段。本文将采用数学解析与损耗分析相结合的方法建立 TCR 阀高电压试验方式的数学模型,将为含晶闸管非线性元件的电路分析提供一种新方法,文章最后利用 PSCAD—EMTDC 仿真结果验证了数学模型的正确性与完备性。

1 TCR 阀高电压试验方式的工作原理

1.1 电路拓扑结构

TCR 阀高电压试验方式的电路拓扑如图2所示。它包括低压直流电源 U_{DC} , 低压大电容 C_0 , 高压小电容 C , 限流电抗器 L_S , 保护电抗器 L_0 , 谐振电抗器 L_1 , 等效的回路电阻 R_0 、 R_1 、 R_S , 试品阀 V_1 , 辅助阀 V_0 、 V_S 。其中 C_0 起到直流支撑作用,图2中虚线以左部分可整体等效为带纹波的直流电源。

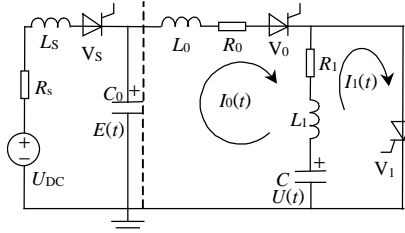


图2 TCR 阀高电压试验方式的电路拓扑

Fig.2 Circuit topology of TCR valve high voltage test mode

电路在稳态工况下,在 V_0 、 V_1 阀均处于截止状态, C 上具有正向(按图示参考方向)高电压时,试品阀 V_1 承受正向试验电压强度;在 V_0 、 V_1 阀均处于截止状态, C 上具有反向(按图示参考方向)高电压时,试品阀 V_1 承受反向试验电压强度;在 V_0 、 V_1 阀分别导通的过程中,试品阀将耐受与 TCR 阀实际工况相符的电压跳变和 di/dt 强度,通过适当的控制方式,即可使试品阀耐受同实际工况相同的高电压强度。

1.2 试验高电压的产生原理

在分析高电压产生原理前,做如下假设:①将图2中虚线以左电路等效为理想的低压直流电源

E ;②电感、电容为理想元件;③单向的 V_0 、 V_1 等效为理想开关元件串联理想二极管元件;④忽略回路电阻,即 $R_0=R_1=0$ 。

TCR 阀高电压试验方式共有2种工作模式,如图3示(图中理想开关 S_1 代表阀 V_1 , S_0 代表阀 V_0 ,粗线表示电流流动路径)。

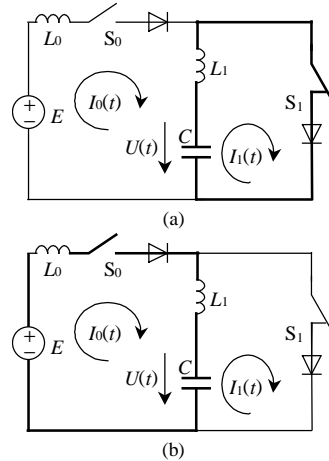


图3 TCR 阀高电压试验方式的工作模式

Fig.3 Operational modes of TCR valve high voltage test

(1) 工作模式1。

如图3(a)所示,开关 S_1 闭合, S_0 断开,此时 C 沿粗线闭合回路振荡半个周波,设振荡前电容 C 具有初始正压 $U(0)=U_+$,则振荡后电容 C 电压反向为 $-U_+=U_-$,此电压为工作模式2的初始电压。

(2) 工作模式2。

如图3(b)所示,开关 S_0 闭合, S_1 断开,此时 E 沿粗线闭合回路给 C 充电,由工作模式1得此时电容器具有初始电压 $U_C(0)=U_-=-U_+$,则回路 KVL 方程为

$$(L_1 + L_0) \frac{di_0(t)}{dt} + \frac{1}{C} \int i_0(t) dt - U_+ = E \quad (1)$$

解之得

$$i_0(t) = (E + U_+) / [w(L_1 + L_0)] \sin wt \quad (2)$$

$$U(t) = -U_+ + (E + U_+)(1 - \cos wt) \quad (3)$$

其中 $w = 1/\sqrt{(L_1 + L_0)C}$,由式(3)得电容 C 工作模式2的最终电压为 $U'_+ = 2E + U_+$ 。

工作模式1、2配合为一个工作周期,由上述分析得,设 C 上初始电压为0,则 C 上电压将按 $2E, 4E, 6E, \dots, 2nE (n=1, 2, 3, \dots)$ 的方式递增,理想工况下每工作一个周期, C 上的试验电压增加 $2E$ 。

1.3 试验高电压的稳定原理

按1.2节中分析的高电压产生原理,理想工况下试验电压将会按照每工作周期 $2E$ 的速度上升;而在实际工况中,由于有损耗(回路电阻损耗、阀的通态

损耗、阀阻尼吸收回路电阻的损耗等)的存在, 每工作周期的能量损耗也将伴随着试验电压的增高而增大。设每工作周期的损耗为 W , 试验电压为 U_+ , 则 $W \propto U_+$, 并且直流支撑电容器 C_0 的电压为一带纹波的直流电压, 设每工作周期 C_0 给后续电路的补能为 $W_E = 1/2C_0(E_+^2 - E_-^2)$ (E_+ 、 E_- 为 C_0 给后续电路补能前后的电压), 则当试验电压升高到某一值后, 有 $W=W_E$ 成立, 试验进入稳态工况, 稳态工况中的试验波形如图 4 示, 工作模式 1、2 的间隔时段是试品阀承受正反向试验电压的时段, 通过调节直流电源 E 的大小可以达到调节稳态试验高压的目的。

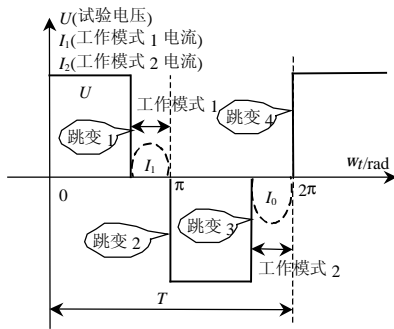


图 4 稳态工况下的试验波形
Fig.4 Test waveforms of steady state

在分析了 TCR 阀高电压试验方式高压的产生和稳定原理后, 本文将采用数学解析与损耗分析相结合的方法建立 TCR 阀高电压试验方式的数学模型。

2 基于损耗分析的数学模型建立

2.1 TCR 阀高电压试验方式的损耗分类

试验中的损耗主要来源于阀阻尼电阻, 回路电阻, 阀阻尼电容的储能, 阀闭锁恢复期间的回路电感储能等。本文采用“ W_{ij} ”表征各类损耗, 其中“ i ”代表损耗的种类(定义参见表 1); “ j ”代表与此损耗相关的阀(“1”代表损耗与试品阀 V_1 相关, “0”代表损耗与辅助阀 V_0 相关)。

表 1 TCR 阀高电压试验方式的损耗分类
Tab.1 Losses classifying of TCR valve high voltage test mode

损耗分类	损耗计算式
阀闭锁后阻尼电阻损耗 W_{1j}	$1/2\Delta V^2 \cdot C_S n_s$
阀闭锁后阻尼电容储能 W_{2j}	$1/2\Delta V_{\text{valve}}^2 \cdot C_S / n_s$
阀闭锁恢复期间回路电感储能 W_{3j}	$1/2L \cdot I_{\pi}^2$
回路电阻损耗 W_{4j}	$I_{\text{RMS}}^2 \cdot R \cdot T$
阀通态损耗 W_{5j}	$1.15P_{\text{T-on}} n_s T$
阀静态均压电阻损耗 W_{6j}	$\Delta V_{\text{valve}}^2 T' / (n_s \cdot R_d)$

表中 C_S 为每层晶闸管的阻尼电容; n_s 为阀串联层数; L 为回路电感; R 为回路电阻; R_d 为每层

阀的静态均压电阻; I_{RMS} 为等效试验频率的电流有效值; R 为回路电阻; T 为试验周期; ΔV_{valve} 为阀跃变电压; $\Delta V = (\Delta V_{\text{valve}} / n_{T\text{min}} + \Delta Q_{rr} / C_S) \cdot f_V$ 为考虑阀反向恢复特性后的过冲电压(f_V 为电压分布因子; $n_{T\text{min}}$ 为去掉冗余层后的阀串联层数; ΔQ_{rr} 为反向恢复电荷的平均值与最小值之差); I_{π} 为晶闸管反向恢复电流的峰值, 与 ΔQ_{rr} 一样均决定于阀关断时刻的电流变化率, $P_{\text{T-on}} = I_{\text{TAV}} \cdot V_{T0} + I_{\text{RMS}}^2 \cdot r_T$ 为晶闸管通态损耗的计算公式(V_{T0} 是晶闸管的门槛电压, r_T 是晶闸管的斜率电阻), T' 为每试验周期内的直流电压作用时间。

试品阀 V_1 开通一次的总能量损耗为^[19]

$$W_{V1} = \sum_{i=1}^5 W_{i1} + \sum_{i=1}^2 W_{i0} \quad (4)$$

辅助阀 V_0 开通一次的总能量损耗为^[19]

$$W_{V0} = \sum_{i=1}^5 W_{i0} + \sum_{i=1}^2 W_{i1} \quad (5)$$

2.2 基于损耗分析的数学模型

设阀 V_1 开通前电容器 C 有正向试验高压 U_+ , 阀 V_1 导通一次闭锁后电容器 C 具有反向试验高压 U_- , 则在阀 V_1 导通一次的过程中回路总共损耗了 W_{V1} 的能量, 则根据能量守恒有

$$\frac{1}{2} C U_+^2 - \frac{1}{2} C U_-^2 = \sum_{i=1}^5 W_{i1} + \sum_{i=1}^2 W_{i0} \quad (6)$$

设阀 V_0 导通前电容器 C_0 具有初始电压 E_+ , 阀 V_0 导通一次补能闭锁后电容器 C_0 剩余电压 E_- , 则根据能量守恒有

$$\frac{1}{2} C_0 E_+^2 - \frac{1}{2} C_0 E_-^2 = \sum_{j=0}^1 (\sum_{i=1}^6 W_{ij} + \sum_{i=1}^2 W_{ij}) \quad (7)$$

又对 V_0 阀导通一次的工况利用微分方程的数学解法可解得

$$U_+ \approx U_- + 2(E_+ - U_-) / [(C_0 + C) / C_0] \quad (8)$$

结合表 1 中各损耗的定义和式(4)~(8)可得基于损耗的 TCR 阀高电压试验方式数学模型为

$$\begin{cases} W_{V1} = \sum_{i=1}^5 W_{i1} + \sum_{i=1}^2 W_{i0} \\ W_{V0} = \sum_{i=1}^5 W_{i0} + \sum_{i=1}^2 W_{i1} \\ \frac{1}{2} C U_+^2 - \frac{1}{2} C U_-^2 = \sum_{i=1}^5 W_{i1} + \sum_{i=1}^2 W_{i0} \\ \frac{1}{2} C_0 E_+^2 - \frac{1}{2} C_0 E_-^2 = \sum_{j=0}^1 (\sum_{i=1}^6 W_{ij} + \sum_{i=1}^2 W_{ij}) \\ U_+ \approx U_- + 2(E_+ - U_-) / [(C_0 + C) / C_0] \end{cases} \quad (9)$$

在回路参数一定的情况下，通过对数学模型的分析可以求解试验过程中的各特定损耗值，亦可对试验电压与所需直流电压的对应关系进行分析。

3 数学模型的定性研究

3.1 试验电压一定时 E_+ 与 C 的关系研究

设定目标试验电压 $U_+=70\text{kV}$ ，参数 $C_0=20\text{mF}$ ， $L_0=1\text{mH}$ ，针对 L_1 分别为 7、17、27mH 的不同电感值， C 与 E_+ 的关系曲线如图 5 示。

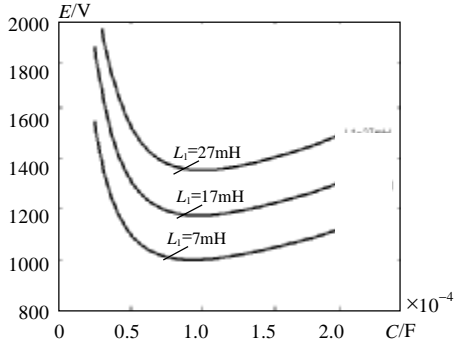


图 5 不同参数条件下 E_+ 关于 C 的关系图
Fig.5 Relation curves of E_+ and C under different parameters

由图 5 可得结论：对于一定的目标试验电压，无论 L_1 的取值如何变化，随着高压电容器 C 的增大，所需的低压电容 C_0 上的直流电压 E_+ 的变化趋势是先减小，后增大；也即意味着对于一定的目标试验电压及某些固定的参数条件下，总可解出使 C_0 所需直流补能电压 E_+ 最小的 C 值。

3.2 E_+/E_+ 与 C_0 取值间的关系研究

U_+ 为 70kV， L_1 取 7mH， L_0 取 1mH 时，不同 C 值下 E_+/E_+ 与 C_0 的关系曲线如图 6 示。由图可得结论：在 C 一定的情况下，随着 C_0 的增大， C_0 给后续电路补能前后的电压比增大并趋于一稳定值，也即 C_0 的电压纹波减小； C_0 一定，随着 C 的增大， C_0 给后续电路补能前后的电压比减小，也即 C_0 的电压纹波增大。

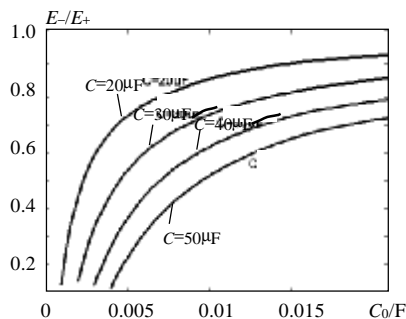


图 6 不同 C 值下 E_+/E_+ 与 C_0 的关系曲线图
Fig.6 Relation curves of E_+/E_+ and C_0 under different C values

4 数学模型的仿真实验

为了验证基于损耗的数学模型的正确性，针对 $C=35\mu\text{F}$ ， $C_0=5000\mu\text{F}$ ， $L_1=7\text{mH}$ ， $L_0=1\text{mH}$ ，回路电阻 $R_1=20\text{m}\Omega$ ， $R_0=10\text{m}\Omega$ ；辅助阀 V_0 每层吸收电容 $1.6\mu\text{F}$ ，吸收电阻 30Ω ，静态均压电阻 $20\text{k}\Omega$ ，36 层串联；试品阀 V_1 每层吸收电容 $2\mu\text{F}$ ，吸收电阻 130Ω ，静态均压电阻 $600\text{k}\Omega$ ，20 层串连；目标试验电压 $U_+=70\text{kV}$ ，试验频率 $f=50\text{Hz}$ 的参数组合。本文将数学模型的计算结果与利用 PSCAD-EMTDC 软件得到的仿真结果进行了对比分析。结果如表 2 示(表 2 中各损耗结果为考虑试验频率后所得的 kW 值)。

表 2 EMTDC 仿真结果与数学模型计算结果的对比表
Tab.2 Comparison of EMTDC simulation and mathematical model calculation

对比量	仿真值	计算值
V_0 阀通态损耗/kW	34.4	32
V_1 阀通态损耗/kW	19.4	18.6
V_0 阀阻尼损耗/kW	22.7	39.1
V_1 阀阻尼损耗/kW	48.4	70.8
回路电阻总损耗/kW	45.3	45.8
V_0 阀均压电阻损耗/kW	5.6	6.7
V_1 阀均压电阻损耗/kW	0.4	0.4
回路电感储能损耗/kW	0	35.9
E_+ /kV	1.22	1.48
E_- /kV	0.27	0.50

由于 EMTDC 仿真软件没有将晶闸管的反向恢复特性(反向恢复电流，恢复电荷等)定义到仿真中，所以仿真并没有考虑由于阀的反向恢复特性引起的损耗，这导致了表 2 中“阀阻尼损耗”、“回路电感储能损耗”、“ E_+ ”、“ U_- ”项的计算结果大于仿真结果，其余各项都能良好吻合。与 EMTDC 仿真结果的对比证明了数学模型的正确性与完备性。

5 结论

(1) 本文给出了 TCR 阀高电压试验方式的电路拓扑与工作原理，提出了一种基于损耗分析的数学模型，该数学模型可用于分析含晶闸管非线性元件的系统；

(2) 利用 Matlab 软件对数学模型进行了定性研究，研究结论为试验装置关键参数的设计提供了理论指导；

(3) 通过某组参数条件下的数学模型计算结果与 EMTDC 仿真结果的对比分析，验证了本文所提数学模型的正确性与完备性。

参考文献

[1] IEC61954, Testing of thyristor valves for static VAR compensators

- [S].
- [2] IEC60700-1, Thyristor valves for high voltage direct current (HVDC) power transmission-Part 1: Electrical testing[S].
- [3] Tang Guangfu, Zhu Jialiu, Wen Jialiang, et al. A modern high power electronics laboratory for FACTS and HVDC equipment[C]. World Engineers' Convention, Shanghai, China, 2004.
- [4] 温家良, 汤广福, 查鲲鹏, 等. 用于高压晶闸管阀复合“全工况”试验装置研究与改进[J]. 电网技术, 2005, 29(2): 38-43.
Wen Jialiang, Tang Guangfu, Zha Kunpeng, et al. Investigation and improvement of the synthetic test circuit for the high voltage thyristor valves[J]. Power System Technology, 2005, 29(2): 38-43(in Chinese).
- [5] Bauer T, Lips H P, Thiele G, et al. Operational tests on HVDC thyristor modules in a synthetic test circuit for the sylmar east restoration project[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(3): 1151-1158.
- [6] Sheng B L, Jansson E. A new synthetic test circuit for the operational tests of hvdc thyristor modules[C]. Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC 2001, Anaheim, USA, 2001.
- [7] 杨旭, 王兆安. 零电压过渡 PWM 软开关电路的损耗计算[J]. 电力电子技术, 1999, 36(1): 29-32.
Yang Xu, Wang zhaoan. Loss analysis of zero-voltage-transition PWM Soft-switching Circuit[J]. Power Electronics, 1999, 36(1): 29-32(in Chinese).
- [8] 曹建安, 裴云庆, 王兆安. Boost PFC 电路中开关器件的损耗分析与计算[J]. 电工电能新技术, 2002, 21(1): 41-44.
Cao Jianan, Pei Yunqing, Wang Zhaoan. Analysis of power dissipation of switching components in boost PFC circuit [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2002, 21(1): 41-44(in Chinese).
- [9] 李圣清, 彭建春. 软开关高功率因数 AC/DC 变流器的损耗分析与参数优化[J]. 株洲工学院学报, 2002, 16(1): 67-70.
Li Shengqing, Peng Jianchun. Research on efficiency of soft switching high power factor AC/DC Converter[J]. Journal of Zhuzhou Institute of Technology, 2002, 16(1): 67-70(in Chinese).
- [10] 唐雄民, 李轶, 彭永进, 等. ZVS-PWM 电路中无损吸收回路分析[J]. 电力电子技术, 2005, 39(2): 108-110.
Tang Xiongmin, Li Yi, Peng Yongjin, et al. Study on lossless snubber circuit of ZVS-PWM inverter[J]. Power Electronics, 2005, 39(2): 108-110(in Chinese).
- [11] Lips H P. Loss determination of hvdc thyristor valves[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1988, 3(1): 358-362.
- [12] IEEE Std 1031-2000. IEEE Guide for the Functional Specification of Transmission Static Var compensators[S].
- [13] 赵中原, 邱毓昌, 于永明, 等. 用晶闸管宏模型分析换流阀内电压分布特性[J]. 电网技术, 2003, 27(9): 33-36.
Zhao Zhongyuan, Qiu Yuchang, Yu Yongming, et al. Analysis of voltage distribution in HVDC converter valve by macro-model of thyristor[J]. Power System Technology, 2003, 27(9): 33-36(in Chinese).
- [14] 李庆民, 徐国政. 大功率 GTO 等效传热模型的研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(1): 19-22.
Li Qingmin, Xu Guozheng. Investigation on the equivalent heat transfer model of large capacity GTO[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(1): 19-22(in Chinese).
- [15] 王鸿雁, 邓焰, 赵荣祥, 等. 飞跨电容多电平逆变器开关损耗最小的 PWM 方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(8): 52-55.
Wang Hongyan, Deng Yan, Zhao Rongxiang, et al. Switching loss minimizing PWM method for flying capacitor multilevel inverter [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(8): 52-55(in Chinese).
- [16] 查鲲鹏, 汤广福, 温家良, 等. 联合试验装置高电压回路的电源研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(22): 1-6.
Zha Kunpeng, Tang Guangfu, Wen Jialiang, et al. The power source research for the high voltage circuit of the synthetic test equipment [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(22): 1-6(in Chinese).
- [17] 阮新波, 李斌, 陈乾宏. 一种适用于高压大功率变换器的三电平直流变换器[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 19-23.
Ruan Xinbo, LI Bin, Chen Qianhong. A new approach for high voltage and high power three-level DC/DC conversion [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(5): 19-23(in Chinese).
- [18] 顾亦磊, 吕征宇. 一种新颖的三电平软开关谐振型 DC/DC 变换器[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(8): 24-28.
Gu Yilei, Lu Zhengyu. A novel three level soft switching resonant DC/DC converter [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(8): 24-28(in Chinese).
- [19] 查鲲鹏, 汤广福, 温家良, 等. 基于联合试验装置的 TCR 阀高电压试验方式损耗分析[J]. 电网技术, 2005, 29(20): 15-19.
Zha Kunpeng, Tang Guangfu, Wen Jialiang, et al. Loss analysis of the tcr valve u-mode test by using the synthetic test equipment [J]. Power System Technology Received, 2005, 29(20): 15-19(in Chinese).

收稿日期: 2005-11-18.

作者简介:

查鲲鹏(1977—), 男, 博士研究生, 从事 FACTS 和 HVDC 技术及其相关试验方法的研究, zhakp@epri.ac.cn;

汤广福(1966—), 男, 教授级高级工程师, 博士, 长期从事 FACTS 和 HVDC 的开发及其相关试验方法的研究;

温家良(1970—), 男, 博士后, 目前主要从事大功率晶闸管阀复合全工况试验装置等效机理研究, 方案研究、设计和试验装置的建设。

(责任编辑 韩 蕾)