灵州－绍兴±800 kV特高压直流输电工程主回路参数设计

特高压直流输电技术是目前解决远距离、大容量输电以及电网非同步互联的一种重要手段。主要针对灵州－绍兴±800 kV直流输电工程中的交直流系统参数、平波电抗器、换流变压器以及换流阀的多项参数进行计算，为系统设备参数的选择提供一定的参考。结合平波电抗器在电流斜率因数上的要求，选取300 mH平波电抗器并提供两种具体方案，同时对灵州换流站和绍兴换流站换流变压器的短路阻抗、相对感性电压降、容量以及直流电压限值等参数进行校核。

周国伟　刘　德　顾用地　刘　杰　周建平/国网浙江省电力公司检修分公司

周国伟/工程师

关键词/Keywords

特高压直流·
平波电抗器·
换流阀·
换流变压器·

0　引言

随着电网负荷的增大，远距离大容量的特高压输变电技术日益发展。相对于特高压交流输电来说，特高压直流输电技术呈现出其在输电损耗小、节约输电走廊以及能够准确快速控制等方面的优势。特高压直流输电首先将交流电整流为直流电，利用直流输电线路传输电能，然后将直流电逆变为交流电，并最终注入交流电网[1]。

灵州－绍兴±800 kV直流输电工程（以下简称“灵－绍直流工程”）是为了进一步落实国家西部大开发战略，扩大“西电东送”的规模，将宁夏宁东（灵州）地区煤电资源优势转化为经济优势，促进更大范围内的资源优化配置，满足华东地区经济社会发展电力需求的一项战略性工程。灵－绍直流工程是哈郑、溪浙工程后又一项±800 kV、额定输送功率为双极8 000MW的特高压直流工程，途经宁夏、陕西、山西、河南、安徽和浙江6省区，线路全长约为1 720 km。

1　系统基本参数

1.1　灵－绍直流工程交流系统条件

灵－绍直流工程的交流系统在灵州换流站的额定运行电压为765 kV，最高极端电压和最低极端电压分别为800 kV和713 kV；绍兴换流站的额定运行电压为510 kV，最高极端电压和最低极端电压分别为550 kV和475 kV，换流站的交流侧均采用一个半断路器接线方式。

换流变压器是连接直流系统与交流系统的重要设备，其采用单相双绕组型式。换流变压器网侧套管在网侧接成YN接线与交流系统直接相连，阀侧套管在阀侧按顺序完成Y、D连接后与12脉动换流阀组相连。换流变压器三相接线组别采用YNy0接线及YNd11接线。

灵州换流站和绍兴换流站的交流系统母线电压及频率参数如表1所示。

表1　交流系统的电压和频率

换流站	交流母线电压/kV					频率/Hz
	额定运行	最高稳态	最低稳态	最低极端	最高极端	
灵州换流站	765	800	750	713	800	50±0.2
绍兴换流站	510	525	490	475	550	50±0.1

1.2　灵－绍直流工程直流系统额定控制参数

灵－绍直流工程是额定输送功率为双极8 000MW，额定直流为5 000 A的特高压直流工程。其阀组采用双极配置，每极由两个12脉动阀组串联，每极换流

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

器电压按400 kV＋400 kV配置[2-3]。

通过逆变侧换流变压器分接头控制直流电压，在稳态工况下，熄弧角γ维持恒定。整流侧触发角α控制直流电流。每极两个串联的12脉动换流器分接头相互独立控制，相差不超过1档，极线对中性母线的直流电压U_{dRN}维持在±0.625%的范围内，相当于逆变站两个分接头档位之间的死区值。

换流器的额定触发角α为15°，实际运行中整流侧换流变压器调节抽头使触发角的变化在±2.5°的范围内。只要触发角α在此范围内，换流变压器分接头就不会动作以使触发角更接近额定值。直流系统基本控制参数如表2所示。

表2 直流系统基本控制参数

参数	参数定义	参数取值
P_d	额定功率（双极/单极）	8 000/4 000 MW
I_{dN}	额定直流电流	5 000 A
α	额定触发角	15°
$\Delta\alpha$	触发角稳态控制范围	±2.5°
α_{min}	最小触发角	5°
γ_N	额定熄弧角	17°
ΔU_{dOLTC}	分接头变化1档对应整流侧直流电压变化	0.625%U_{dRN}
ΔI_{dOLTC}	分接头变化1档对应的直流电流变化	0.625%I_{dN}

1.3 设备制造公差和测量误差

由于实际生产制造的设备并不能完全和设计值完全一致，比如换流变压器的相对感性电压降受到换流变压器的制造水平以及线圈布置等因素的影响导致其部分参数与设计值不一致；但是无论是实际运行的一次设备还是用于监控的测量设备，其误差水平要满足一定的范围，只有这样才能使设备安全高效的运行。设备的制造和测量误差如表3所示。

表3 设备制造和测量误差

参数	参数定义	误差范围
d_x	正常直流电压运行范围内换流变压器相对感性电压降的最大制造公差（δd_x）	±5%d_{xN}
U_d	测量误差δU_{dmeas}	±0.5%U_{dRN}
U_{dio}	电容分压式电压互感器的测量误差δU_{dio}	±1%U_{dioN}
I_d	测量误差δI_{dmeas}	±0.3%I_{dN}
γ	测量误差$\delta\gamma$	±1.0°
α	测量误差$\delta\alpha$	±0.5°

1.4 直流线路参数

直流线路电阻的设计同逆变侧换流器、换流变压器容量存在较大关系。在额定运行工况下，整流侧直流电压为800 kV，逆变侧直流电压完全由直流线路电阻决定，进而决定逆变侧的换流容量。

灵－绍直流工程线路全长约为1 720 km，直流线路采用6×JL1/G3A－1250/70和6×JL1/G2A－1250/100，直流线路电阻R_d参数如表4所示。

表4 直流线路电阻

额定运行/Ω	最大值/Ω	最小值/Ω
6.66	7.93	5.64

2 平波电抗器选择

平波电抗器是特高压直流输电系统中的重要设备，具备以下主要功能：在轻载时防止电流断续；当直流侧发生故障时，抑制过高的直流电流上升率，保护换流阀免受部分过电压、过电流损坏；滤除一定的谐波[4]。

电流斜率因数[5]（单位为ms）为

$$S_i=\frac{U_{dN}}{L_d I_{dN}} \quad (1)$$

式中，U_{dN}为额定直流电压，kV；L_d为直流平波电抗器参数，H；I_{dN}为额定直流电流，A；S_i取值范围为$0.22<S_i<1$[5]。

在换流站的设计中，一般S_i取值0.5左右。该取值含义为，在平波电抗器后发生直流短路，直流电流会在5 ms内上升2.5I_{dN}。

由式（1）及U_{dN}＝800 kV，I_{dN}＝5 000 A，S_i＝0.5计算可得L_d＝320 mH。

绍兴换流站每极装设电感量可以按照300 mH考虑，并将每极300 mH平波电抗器分成两组，分别布置在直流极母线和中性母线上。结合目前设备制造能力，平波电抗器可以采用两种方案。方案一：采用3台电感值为50 mH的平波电抗器串联；方案二：采用两台电感值为75 mH的平波电抗器串联。方案二在占地面积上要小于方案一[6-7]。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3 换流变压器短路阻抗和相对感性电压降

对换流变压器短路阻抗影响较大的因素有：晶闸管换流阀的浪涌电流水平；换流器消耗的无功功率和产生的谐波；换流变压器短路阻抗对成本的影响以及运输尺寸的限制。

换流变压器短路阻抗的选择确保换流阀短路电流不超过换流阀允许的最大短路电流值。换流站接入交流系统的短路容量、直流系统的短路故障程度和控制策略对流过换流阀的短路电流有较大影响。

通常基于以下条件考量换流器的短路电流：整流器运行在$\alpha=5°$，直流双极2 h过负荷功率下甩负荷引起换流母线过电压。

此时，换流阀承受的最大短路冲击电流I_S在所有可能的故障情形中最大，即$I_S=2.299I_{S3}$，式中，I_{S3}为三相短路电流幅值。

通常在故障后第1个周期内相应的故障控制会动作，此时仅发生半个周期的两相短路，I_S将降为两相短路电流幅值I_{S2}的2倍，即$I_S=2I_{S2}$。

桥臂短路时，换流阀承受的最大短路冲击电流为

$$I_{S1}=2I_{S2_max}=\frac{2I_{dN}}{u_k+S_N/I_{SC_max}} \tag{2}$$

式中，S_N为单桥换流变压器额定容量；S_{SC_max}为交流系统最大短路容量；u_k为换流变压器短路阻抗。

由式（2）可知

$$u_k\geqslant\frac{2I_{dN}}{I_{S2_max}}-\frac{S_N}{S_{SC_max}} \tag{3}$$

绍兴换流站500 kV交流场及灵州换流站750 kV交流场设备最大短路水平均按63 kA考虑。对6英寸5 000 A/8 500 V电控晶闸管来说，最大可承受的短路电流为53 kA，由于无法确定灵州换流站晶闸管的具体参数，所以本文中换流阀所承受的最大电流取为50 kA。

由式（3）计算可得，绍兴换流站换流变压器短路阻抗$u_k\geqslant19.30\%$，灵州换流站换流变压器短路阻抗$u_k\geqslant19.50\%$。工程实际中换流变压器的短路阻抗要比计算值略小，主要是为了降低无功补偿的容量。

换流器额定相对感性电压降d_{xN}定义为

$$d_{xN}=\frac{3}{\pi}\frac{X_tI_{dN}}{U_{dioN}} \tag{4}$$

式中，X_t为换相电抗；U_{dioN}为换流变压器阀侧额定空载直流电压。

换相电抗X_t包含参与换相过程的换流变压器漏抗和其他电抗。换流器额定相对感性电压降d_{xN}与换流变压器短路阻抗u_k之间的关系为

$$d_{xN}\approx\frac{1}{2}u_k \tag{5}$$

由式（3）～式（5）计算可得，绍兴换流站换流器感性电压降$d_{xI}=9.65\%$，灵州换流站换流器感性电压降$d_{xR}=9.75\%$。

4 换流阀前向电压降和相对阻性电压降

灵－绍直流工程采用6英寸5 000 A/8 500 V电控晶闸管，在实际应用中，要考虑晶闸管及其外围电路的各种损耗和电压降，如晶闸管的通态损耗、开通关断损耗、均压电阻损耗、阻尼回路损耗和电抗器损耗等。

对每个6脉动换流器来说，相对阻性电压降d_r为

$$d_r=\frac{2R_{th}I_{dN}}{U_{dioN}}+\frac{P_{cu}}{U_{dioN}I_{dN}} \tag{6}$$

式中，R_{th}为晶闸管上与通过电流相关的损耗；P_{cu}为换流变压器和平波电抗器在额定运行时的损耗。

根据灵－绍工程采用的换流阀的开关特性，d_r一般为0.3%，换流阀前向电压降U_t一般取0.3 kV。由以上可得，换流器的参数如表5所示。

表5 换流阀参数

	换流阀参数			
	每极12脉动桥数	相对感性电压降d_{xN}	相对阻性电压降d_{rN}	换流阀电压降U_t
灵州换流站	2	11.5%	0.3%	0.3 kV
绍兴换流站	2	9%	0.3%	0.3 kV

5 换流变压器参数计算

灵－绍直流输电工程主回路采用双12脉动换流器的接线方式，主回路参数设计中需要确定6脉

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

动换流器的整流站和逆变站额定空载直流电压、空载直流限值等，这些参数是确定换流变压器相关参数的基础。

5.1 换流变压器额定空载直流电压

对于灵州换流站，换流变压器额定空载直流电压为

$$\frac{U_{dR}}{n}=U_{dioR}\left[\cos\alpha-(d_{xR}+d_{rR})\frac{I_d}{I_{dN}}\frac{U_{dioNR}}{U_{dioR}}\right]-U_t \quad (7)$$

对于绍兴换流站，换流变压器额定空载直流电压为

$$\frac{U_{dI}}{n}=U_{dioR}\left[\cos\gamma-(d_{xI}+d_{rI})\frac{I_d}{I_{dN}}\frac{U_{dioNR}}{U_{dioR}}\right]-U_t \quad (8)$$

在额定工况下，由式（7）、式（8）可得

$$U_{dioNR}=\frac{\frac{U_{dNR}}{n}+U_t}{\cos\alpha_N-(d_{xNR}+d_{rNR})} \quad (9)$$

$$U_{dioNI}=\frac{\frac{U_{dNR}-R_{dN}I_{dN}}{n}-U_t}{\cos\gamma_N-(d_{xNI}-d_{rNI})} \quad (10)$$

式中，$n=4$，$U_{dNR}=800$ kV，$d_{xNR}=9.75\%$，$d_{xNI}=9.65\%$，$\alpha_N=15°$，$\gamma_N=17°$，$U_t=0.3$ kV，$R_d=6.66\ \Omega$，$d_{rNR}=0.3\%$，$d_{rNI}=0.3\%$。

由式（9）、式（10）计算可得，$U_{dioR}=231.45$ kV；$U_{dioI}=221.80$ kV。

5.2 换流变压器容量

换流变压器阀侧线电压与换流器理想空载电压之间具有如下关系，即

$$U_v=\frac{\pi}{3}\frac{U_{dio}}{\sqrt{2}} \quad (11)$$

对于灵州换流站换流变压器

$$U_{vNR}=\frac{\pi}{3}\frac{U_{dioNR}}{\sqrt{2}} \quad (12)$$

对于绍兴换流站换流变压器

$$U_{vNI}=\frac{\pi}{3}\frac{U_{dioNI}}{\sqrt{2}} \quad (13)$$

由式（11）～式（13）计算可得，$U_{vNR}=171.32$ kV，$U_{vNI}=164.18$ kV。

换流变压器阀侧线电流与换流器直流侧电流之间具有如下关系，即

$$I_v=\sqrt{\frac{2}{3}}I_d \quad (14)$$

如果换流变压器采用Y形联结，则

$$I_{vdN}=I_{vN} \quad (15)$$

如果换流变压器采用D形联结，则

$$I_{vdN}=\frac{I_{vN}}{\sqrt{3}} \quad (16)$$

由式（14）～式（16）计算得，$I_{vYN}=4\,082$ A，$I_{vdN}=2\,357$ A。

换流变压器的额定容量为

$$S_n=\sqrt{3}U_{vN}I_{vN}=\frac{\pi}{3}U_{dioN}I_{dN} \quad (17)$$

对于灵州－绍兴直流项目，采用单相双绕组变压器，则每台变压器的额定容量为

$$S_{n2w}=\frac{1}{3}S_n=\frac{\pi}{9}U_{dioN}I_{dN} \quad (18)$$

由式（17）～式（18）计算可得，灵州换流站换流变压器容量为403.75 MV·A，绍兴换流站换流变压器容量为386.92 MV·A。

5.3 直流电压限值

对于灵州换流站，每个6脉动换流器两端的直流电压限值为

$$U_{dioR}=\frac{\frac{U_{dR}}{n}+U_t+(d_{xR}+d_{rR})\frac{I_dU_{dioNR}}{I_{dN}}}{\cos\alpha} \quad (19)$$

对于绍兴换流站，每个6脉动换流器两端的直流电压限值为

$$U_{dioI}=\frac{\frac{U_{dR}-R_dI_d}{n}-U_t+(d_{xI}-d_{rI})\frac{I_dU_{dioNI}}{I_{dN}}}{\cos\gamma} \quad (20)$$

式（19）、式（20）中参数取值如下：$n=4$；$U_{dR}=U_{dNR}(1.0+\delta U_{dOLTC}+\delta U_{dmeas})$；$d_{xR}=d_{xN}(1.0+\delta d_x)$；$d_{xI}=d_{xN}(1.0+\delta d_x)$；$I_d=I_{dN}(1.0-\delta I_{dOLCT}+\delta I_{dmeas})$；$\alpha=\alpha_N-\Delta\alpha$；$\gamma=\gamma_N+\Delta\gamma$；$R_d=R_{dmin}$。

由式（19）、式（20）计算可得：$U_{dR}=809$ kV；$d_{xR}=10.24\%$；$d_{xI}=10.13\%$；$I_d=4.983\ 75$ kA；$\alpha=12.5°$；$\gamma=18°$。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

由于U_t=0.3 kV，R_d=5.64 Ω，d_{rR}=0.3%，则计算可得：$U_{diomaxR}$=232.37 kV；$U_{diomaxI}$=227.79 kV。

选取$U_{dioGR}=U_{diomaxR}$=232.37 kV，$U_{dioLI}=U_{diomaxI}$=227.79 kV，并令

$$U_{dioLR}=U_{dioGR}+1.5\Delta\eta U_{dioNR} \tag{21}$$

$$U_{dioGI}=U_{dioLI}-1.5\Delta\eta U_{dioNI} \tag{22}$$

式中，$\Delta\eta$为变压器分接头档距，灵州换流站换流变压器为0.86%，绍兴换流站换流变压器为1.25%。

由式（21）、式（22）计算可得，U_{dioLR}=235.36 kV；U_{dioGI}=230.65 kV。

5.4 换流变压器设计电压

换流变压器是超高压直流输电工程中至关重要的关键设备，是交、直流输电系统中的换流、逆变两端接口的核心设备。其安全投入和运行是工程取得发电效益的关键和重要保证。由于有交、直流电场、磁场的共同作用，所以换流变压器的结构特殊、复杂，关键技术高难，对制造环境和加工质量要求严格[8]。

换流变压器的运行电压是其一项重要的参数，其电压的设计不仅要考虑到换流变压器自身制造过程中所引入的误差，还要考虑到电压的测量所引起的误差。

考虑测量误差情况下的灵州换流站换流变压器设计电压为

$$U_{dioabsmaxR}=(1.0+\Delta U_{dio})U_{dioLR} \tag{23}$$

考虑测量误差情况下的绍兴换流站换流变压器设计电压为

$$U_{dioabsmaxI}=(1.0+\Delta U_{dio})U_{dioLI} \tag{24}$$

由式（23）、式（24）计算可得，灵州换流站换流变压器设计电压$U_{dioabsmaxR}$=237.71 kV，绍兴换流站换流变压器设计电压$U_{dioabsmaxI}$=232.96 kV。

5.5 换流变压器有载开关分接头选择

换流变压器的最大空载直流电压$U_{diomaxOLTCR}$和最小空载直流电压$U_{diominOLTCR}$是换流变压器分接头设计的基础。

1）由5.3节知，灵州换流站换流变压器的最大空载直流电压$U_{diomaxOLTCR}=U_{diomaxR}$=232.37 kV。灵州换流站换流变压器的最小空载直流电压$U_{diominOLTCR}$的计算。

$$U_{dioR}=\frac{\frac{U_{dR}}{n}+U_t+(d_{xR}+d_{rR})\frac{I_dU_{dioNR}}{I_{dN}}}{\cos\alpha} \tag{25}$$

式中，最小空载直流电压参数取值如下：$n=4$；$U_{dR}=U_{dNR}(1.0-\delta U_{dOLTC}-\delta U_{dmeas})$；$d_{xR}=d_{xN}(1.0-\delta d_x)$；$I_d=I_{dN}(0.1+\delta I_{dOLCT}-\delta I_{dmeas})$；$\alpha=\alpha_N+\Delta\alpha$。

由式（25）以及各参数的值计算可得，$U_{diomaxOLTCR}=U_{diomaxR}$=232.37 kV，$U_{diominOLTCR}$=208.31 kV。

2）绍兴换流站换流变压器的最大空载直流电压$U_{diomaxOLTCR}$的计算。

$$U_{dioI}=\frac{\frac{U_{dR}-R_dI_d}{n}-U_t+(d_{xI}-d_{rI})\frac{I_dU_{dioNI}}{I_{dN}}}{\cos\gamma} \tag{26}$$

式中，最大空载直流电压参数取值如下：$n=4$；$U_{dR}=U_{dNR}(1.0-\delta U_{dOLTC})$；$d_{xI}=d_{xN}(1.0+\delta d_x)$；$I_d=I_{dN}(1.0+\delta I_{dOLCT}+\delta I_{dmeas})$；$\gamma=\gamma_N+\Delta\gamma$；$R_d=R_{dmin}$。

由式（26）以及各参数的值计算可得，绍兴站换流变压器最大空载直流电压$U_{diomaxOLTCR}$=224.32 kV。

3）绍兴换流站换流变压器的最小空载直流电压$U_{diominOLTC}$的计算

$$U_{dioI}=\frac{\frac{U_{dR}-R_dI_d}{n}-U_T+(d_{xI}-d_{rI})\frac{I_dU_{dioNI}}{I_{dN}}}{\cos\gamma} \tag{27}$$

式中，最小空载直流电压参数取值如下：$n=4$；$U_{dR}=U_{dNR}(1.0+\delta U_{dmeas})$；$d_{xI}=d_{xN}(1.0-\delta d_x)$；$I_d=I_{dN}(1-\delta I_{dOLCT}+\delta I_{dmeas})$；$\gamma=\gamma_N-\Delta\gamma$；$R_d=R_{dmax}$。

由式（27）计算可得，绍兴换流站换流变压器最小空载直流电压$U_{diominOLTC}$=219.16 kV。

换流变压器的最大电压比为

$$n_{max}=\frac{U_{Imax}}{U_{IN}}\frac{U_{dioN}}{U_{diomin}} \tag{28}$$

由式（28）计算可得，对灵州换流站换流变压器最大电压比n_{maxR}=1.162，绍兴换流站换流变压器最大电压比n_{maxI}=1.091。

换流变压器的最小电压比为

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$n_{\min}=\frac{U_{\mathrm{Imin}}}{U_{\mathrm{IN}}}\frac{U_{\mathrm{dioN}}}{U_{\mathrm{diomaxOLTC}}} \tag{29}$$

灵州换流站换流变压器最小电压比n_{minR}=0.976 5，绍兴换流站换流变压器最小电压比n_{minI}=0.95。

换流变压器有载调压分接头的档位和调节步长关系为

$$T_{\mathrm{step}}=\frac{n_{\mathrm{T}}-1}{\Delta\eta} \tag{30}$$

式中，$\Delta\eta$为分接头的调节步长，灵州换流站为0.86%，绍兴换流站为1.25%；n_{T}为换流变压器的电压比；T_{step}为换流变压器的档位。

由式（30）计算结果可得，灵州换流站换流变压器的档位为+19/−3，绍兴换流站换流变压器的档位为+8/−4。

6 结束语

1）绍兴换流站每极装设平波电抗器电感量为300 mH，为节约占地面积，实际采用两台电感值为75 mH的平波电抗器串联实施。

2）绍兴换流站换流变压器的短路阻抗和感性电压降计算值分别为$u_{\mathrm{k}}\geqslant$19.3%，d_{xI}=9.65%，实际采用u_{k}=17.8%，d_{xI}=9%；灵州换流站换流变压器短路阻抗和感性电压降计算值分别为$u_{\mathrm{k}}\geqslant$19.5%，d_{xN}=9.75%，实际采用$u_{\mathrm{k}}\geqslant$23%，d_{xN}=11.5%。目的是为了减少无功补偿的容量，节约项目投资费用。

3）计算得出绍兴换流站换流变压器容量为386.92 MV·A，灵州换流站换流变压器容量为403.75 MV·A；绍兴换流站换流变压器实际采用容量为384.2 MV·A，灵州换流站实际采用容量为412.3 MV·A。计算值和实际采用值相差不大，存在差别的原因在于换流变压器短路容量对计算结果产生的差别。

本文主要是针对灵州－绍兴±800 kV特高压直流输电工程主回路进行初步计算，由于在计算过程中部分参数（如换流变压器短路容量）还未完全确定，可能和实际设计有偏差；此外，换流变压器的分接头仅仅是计算值，由于实际采用多种运行方式，分接档数会超过设计值。本文的设计思路以及计算方法对实际工作具有一定的参考价值。

参考文献

[1] 李晓黎，陈祖胜．特高压直流输电技术发展综述[J]．广西电力，2009 (1)：23-26.

[2] 刘振亚．特高压电网 [M]．北京：中国经济出版社，2005.

[3] 刘振亚．特高压直流输电理论 [M]．北京：中国电力出版社，2009.

[4] 陈锡磊，周浩，沈扬．溪洛渡－浙西±800 kV/7 500 MW特高压直流输电工程主回路参数设计[J]．电网技术，2011，35 (12)：26-32.

[5] 雷园园，赵现平．±800 kV云广直流输电工程平波电抗器参数选择和布置方案 [J]．高压电器，2012，48 (6)：75-84.

[6] 杨汾艳，徐政．直流输电系统平波电抗器电感参数的选择研究 [J]．高压电器，2009，45 (3)：8-14.

[7] Chen Xiaoxuan，Lv Jinzhuang，Gou Ruifeng．Study for arrangement of the smoothing reactor in ±800 kV UHVDC project [C]．International Conference on High Voltage Engineering and Application，Chongqing，China，IEEE，2008：371-374.

[8] 杨汾艳，徐政．直流输电系统换流变压器短路阻抗的选择 [J]．高电压技术，2008，34 (8)：1628-1632.

（收稿日期：2015－06－20）EA

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net