

# HVDC 滤波换相换流器的阻抗频率特性

李季, 罗隆福, 许加柱, 李勇, 张杰, 刘福生

(湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南省 长沙市 410082)

## Impedance-Frequency Characteristic of HVDC Filter Commutated Converter

LI Ji, LUO Long-fu, XU Jia-zhu, LI Yong, ZHANG Jie, LIU Fu-sheng

(School of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan Province, China)

**ABSTRACT:** The impedance-frequency characteristic of converters in HVDC power transmission is an important factor in the analysis and solution of harmonic instability. Filter commutated converter (FCC) is such a kind of converter that possesses both functions of harmonics suppression and reactive power compensation at the valve side, in this paper the wiring scheme and working mechanism of FCC are described in brief, and based on switching function method the theoretical derivation of calculation formula for AC and DC equivalent impedances of FCC is given while the impact of commutation process in the converter is taken into account. Taking the development platform of HVDC power transmission for example, the calculation result of impedance-frequency characteristic of traditional line commutated converter (LCC) and that of FCC are compared. Simulation results show that the impact of impedance-frequency characteristic of converter on the resonance frequency of AC system is not negligible, and FCC can enhance the strength of AC system in a certain extent, improve system stability and effectively reduce AC equivalent impedance under resonance frequency, thus the harmonic instability of HVDC power transmission system can be avoided.

**KEY WORDS:** impedance-frequency characteristic; HVDC power transmission; filter commutated converter; harmonic suppression; switching function method; equivalent impedance

**摘要:** 高压直流输电(HVDC)换流器的阻抗频率特性是分析和解决谐波不稳定的一个重要因素, 滤波换相换流器(filter commutated converter, FCC)是一种具有阀侧谐波抑制兼无功功率补偿功能的换流器, 文章简要论述了 FCC 的接线方案和工作机理, 并基于开关函数法对计及换流器换相过程影响下的 FCC 交、直流等值阻抗计算式进行了理论推导。以直流输电开发平台为例, 对传统电网换相换流器(line commutated converter, LCC)与 FCC 的阻抗频率特性计算结果进行对比, 仿真结果表明换流器的阻抗频率特性对交流系

统的谐振频率有着不可忽略的作用, FCC 在一定程度上提高了交流系统强度, 改善了系统稳定性, 有效降低了系统谐振频率下的交流等值阻抗, 从而更好避免直流输电系统谐波不稳定现象的发生。

**关键词:** 阻抗频率特性; 高压直流输电; 滤波换相换流器; 谐波抑制; 开关函数法; 等值阻抗

## 0 引言

在高压直流输电(high voltage direct current, HVDC)中, 维持交直流系统的稳定、可靠运行是一项基本的要求。电力系统中的背景谐波、各种电力系统扰动和谐波不稳定现象等因素的存在, 使得实际的 HVDC 运行于非理想状态, 在一定条件下甚至导致 HVDC 系统稳定破坏的严重后果<sup>[1-3]</sup>。

谐波不稳定现象主要表现为换流器的存在导致谐波在交、直流系统中被放大, 最终致使换流站母线电压严重畸变, 引起谐波超标, 导致换流器换相失败, 乃至 HVDC 系统闭锁。HVDC 换流器的阻抗频率特性对于避免系统发生谐振和谐波不稳定现象具有重要意义。在该研究领域内, 文献[4-6]阐述了换流器在交直流系统内对谐波电压、电流的传变关系, 并采用不同的计算方法对换流器的阻抗频率特性进行大量的分析研究, 结果均证明换流器对交、直流系统的阻抗频率特性有较大影响, 尤其是对谐振频率影响显著。文献[7]列举了目前针对谐波不稳定工程中所采取的抑制措施, 但这些方法并未从根本上消除这一现象。

本文以“新型换流变压器及其滤波系统”<sup>[8]</sup>为核心, 配合晶闸管换流器为一整体, 提出一种滤波换相换流器(filter commutated converter, FCC), 该换流器具有阀侧谐波屏蔽兼无功功率补偿的功能, 能够增强交流系统强度, 改善系统的稳定性。本文

主要阐述 FCC 的接线方式和工作机理,并在文献[6]的基础上,采用开关函数法,对 FCC 交、直流等值阻抗进行计算,并基于直流输电研究开发平台,对 FCC 和传统电网换相换流器(line commutated converter, LCC)的阻抗频率特性进行仿真对比分析,验证 FCC 的原理正确性以及应用于谐波不稳定中的良好抑制效果。

### 1 滤波换相换流器基本工作原理

#### 1.1 接线形式

12 脉动 FCC 的接线方案如图 1 所示,它由新型换流变压器及阀侧滤波器和 12 脉动换流桥 2 部分组成。新型换流变压器网侧绕组 AO、BO 和 CO 采用普通的 Y 型联结,中性点引出接地;阀侧绕组由 2 套绕组组成,均采用延边三角形联结,一套绕组由 3 相延边绕组和公共绕组构成,其延边绕组为 a<sub>1</sub>d<sub>1</sub>、b<sub>1</sub>e<sub>1</sub> 和 c<sub>1</sub>f<sub>1</sub>,公共绕组由 d<sub>1</sub>e<sub>1</sub>、e<sub>1</sub>f<sub>1</sub> 和 f<sub>1</sub>d<sub>1</sub> 组成;另一套绕组的延边绕组为 a<sub>2</sub>d<sub>2</sub>、b<sub>2</sub>e<sub>2</sub> 和 c<sub>2</sub>f<sub>2</sub>,公共绕组由 d<sub>2</sub>e<sub>2</sub>、e<sub>2</sub>f<sub>2</sub> 和 f<sub>2</sub>d<sub>2</sub> 组成;在节点 d<sub>1</sub>、e<sub>1</sub>、f<sub>1</sub> 和 d<sub>2</sub>、e<sub>2</sub>、f<sub>2</sub> 处引出抽头,并联具有全调谐特点的无源滤波器,用于给换流器阀侧含量较高的特征谐波提供通路<sup>[8]</sup>。

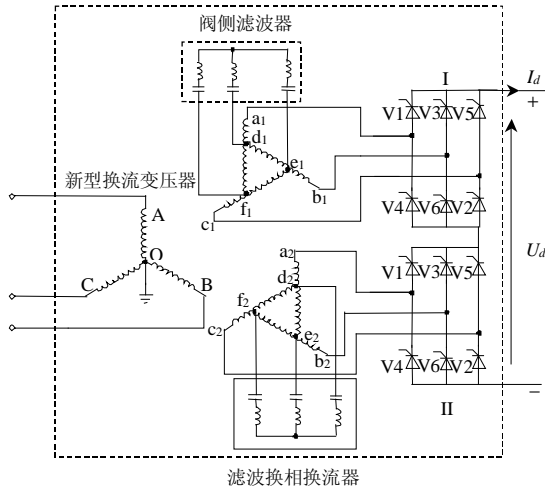


图 1 FCC 接线方案

Fig. 1 The wiring scheme of FCC

#### 1.2 矢量分析

根据图 1 中 FCC 的绕组接线方案,2 套绕组通过不同的联结次序,可使得换流桥 I 和 II 的相电压分别前移 15°、后移 15°,从而满足换流器 12 脉动的要求,此时各绕组的电压相量图如图 2 所示。

假定换流变压器网侧绕组与阀侧绕组线电压比为 1,一次侧绕组匝数为 1.0pu,根据正弦定理,

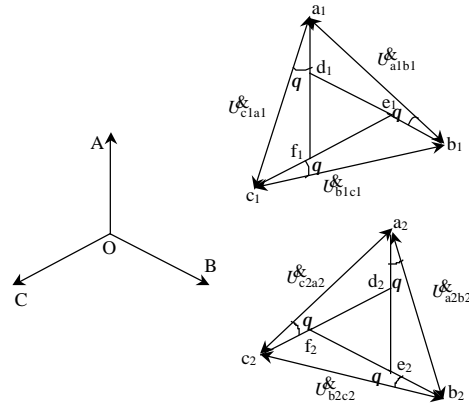


图 2 绕组电压相量图

Fig. 2 Voltage vector of windings

可计算求得

$$k_c = \frac{W_2}{W_1} = 0.897 \quad (1)$$

$$k_e = \frac{W_3}{W_1} = 0.518 \quad (2)$$

式中: W<sub>1</sub>、W<sub>2</sub>、W<sub>3</sub> 分别为网侧绕组、公共绕组和延边绕组匝数; k<sub>c</sub>、k<sub>e</sub> 分别为延边绕组、公共绕组与网侧绕组之间的匝比。

#### 1.3 谐波抑制原理

将图 1 所示 FCC 系统简化为单相,并用等值电路表示,如图 3 所示。图中: U<sub>3</sub> 为与换流阀组相接的变压器延边绕组电压; U<sub>1</sub> 为网侧绕组电压; U<sub>2</sub> 为变压器公共绕组电压; I<sub>hs</sub>、I<sub>1</sub>、I<sub>2</sub> 分别为延边绕组、网侧绕组和公共绕组的谐波电流; r<sub>1</sub>、x<sub>1</sub>, r<sub>2</sub>、x<sub>2</sub>, r<sub>3</sub>、x<sub>3</sub> 分别为网侧绕组、公共绕组、延边绕组的等值电阻和等值电抗; C、L 分别为公共绕组所联滤波器中的电容和电感。

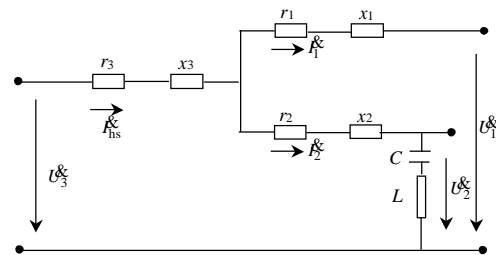


图 3 FCC 谐波抑制等值电路

Fig. 3 Harmonic suppression equivalent circuit of FCC

由换流阀组产生的谐波电流通过延边绕组 3,再经过网侧绕组 1 和公共绕组 2 分流,流过绕组 1、2 的谐波电流与其等值电抗的大小成反比,当绕组 2 的等值电抗远小于绕组 1 的等值电抗时(新型换流变压器在设计制造时,要求确保绕组 2 的短路漏电

感接近于零), 大部分谐波电流通过绕组 2。此时, 在绕组 2 处接入全调谐的 LC 谐振电路时, 谐波电流通过滤波支路对地短路, 并且理论分析和实验研究表明, 这种参数选择不会引起谐振过电压, 从而达到 FCC 阀侧谐波抑制的功能。

## 2 交流系统强度与系统稳定性

在 HVDC 系统中, 交流系统短路比(short circuit ratio, SCR) $e_{SCR}$  和有效短路比(effective short circuit ratio, ESCR) $e_{ESCR}$  的大小直接反映了交流系统相对于直流系统的强弱, 对系统的稳定性有很大影响, 与弱交流系统相连的 HVDC 更容易发生谐波不稳定等问题<sup>[9]</sup>。

$$e_{SCR} = \frac{S_{sc}}{P_{dn}} = \frac{1}{Z_{pu}} \quad (3)$$

式中:  $S_{sc}$  为交流系统短路容量;  $P_{dn}$  为额定直流输送功率;  $Z_{pu}$  为交流系统等值阻抗的标么值。

考虑到无功补偿设备的影响则更有意义, 即

$$e_{ESCR} = \frac{S_{sc} - Q_c}{P_{dn}} = \frac{1}{Z_{pu}} - B_{cpu} \quad (4)$$

式中:  $Q_c$  为交流滤波器及补偿电容器所产生的无功;  $B_{cpu}$  为交流滤波器及补偿电容的等值电纳标么值。

本文以 CIGRE first bench mark 标准测试系统模型<sup>[10]</sup>为基准, 分别计算得出传统 HVDC 和基于 FCC 的新型直流输电(FCC-HVDC)的交流系统等值阻抗的阻抗频率特性, 如图 4 所示。由图 4 可知, 由于 FCC 方案中将传统直流输电系统中交流网侧的特征谐波滤波装置移置于换流器阀侧公共绕组, 进行谐波滤波兼无功功率补偿, 这同时改变了交流系统等值阻抗的阻抗频率特性, 使交流系统的并联谐振点的位置更向高频范围内偏移, 在一定程度上增强了交流系统强度<sup>[9]</sup>。计算结果表明, 传统 HVDC 系统的有效短路比  $e_{ESCR}$  为 2.0, 而与其传输容量相当的 FCC-HVDC 的标准测试模型的  $e_{ESCR}$  则为 2.272, 提高为传统情况的 1.136 倍。

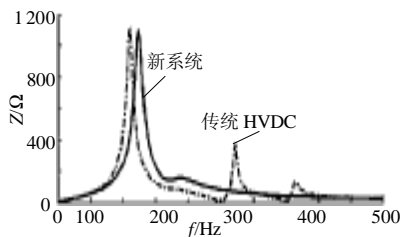


图 4 交流系统等值阻抗的阻抗频率特性  
Fig. 4 The relationship between AC equivalent impedance and frequency

## 3 换流器阻抗频率特性

### 3.1 开关函数理论

换流器的阀臂相当于电力电子开关, 其导通时相当于逻辑“1”, 关断时相当于逻辑“0”, 因此可认为直流电压是交流三相电压被开关函数调制的结果, 而交流电流是直流电流被开关函数调制的结果<sup>[6,11]</sup>, 如式(5)和式(6)所表示。

$$u_{dc} = u_a S_{ua} + u_b S_{ub} + u_c S_{uc} \quad (5)$$

$$i_a = i_{dc} S_{ia}, \quad i_b = i_{dc} S_{ib}, \quad i_c = i_{dc} S_{ic} \quad (6)$$

式中: ( $S_{ua}$ 、 $S_{ub}$ 、 $S_{uc}$ )和( $S_{ia}$ 、 $S_{ib}$ 、 $S_{ic}$ )分别为电压开关函数和电流开关函数。不考虑换相过程中电压开关函数和电流开关函数具有相同的形式, 考虑开关换相后电压开关函数和电流开关函数具有不同形式, 以 6 脉动换流器 a 相电压、电流随时间  $t$  的变化为例, 其开关函数图形如图 5 所示。现代 HVDC 技术中等间距控制方式被广泛使用, 共阳或者共阴的阀依次相差  $120^\circ$  进行换相, 因此可以对开关函数进行傅里叶级数展开, a、b、c 相开关函数的通用形式用式(7)表示。

$$\begin{cases} S_a = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos n\omega t \\ S_b = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos n(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ S_c = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos n(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (7)$$

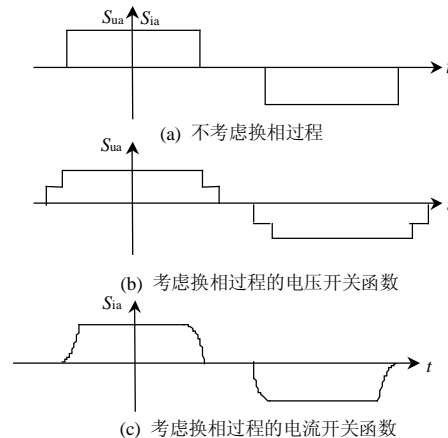


图 5 6 脉动换流器的开关函数

Fig. 5 The switching function of 6 pulsation converter

对于 6 脉动换流器, 不考虑换相过程时, 其系数  $A_n$  为式(8)。考虑换相后, 换相期间为母线电压一半, 电压开关函数的系数在  $A_n$  基础上进行修正为式(9), 电流开关函数修正为式(10)。

$$A_n = \frac{4}{\pi n} \sin \frac{n\pi}{2} \cos \frac{n\pi}{6} \quad (8)$$

$$A_{nu} = A_n \cos(nm/2) \quad (9)$$

$$A_{ni} = A_n \sin \frac{nm}{2} / \frac{nm}{2} \quad (10)$$

对于 12 脉波换流器, 其开关函数及相应的系数分别为式(11)~(14)表示

$$\begin{cases} S_a = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \cos n\omega t \\ S_b = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \cos n(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ S_c = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \cos n(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (11)$$

$$B_n = A_n \cdot (\frac{1}{2} + \frac{1}{\sqrt{3}} \cos \frac{n\pi}{6}) \quad (12)$$

$$B_{nu} = A_{nu} \cdot (\frac{1}{2} + \frac{1}{\sqrt{3}} \cos \frac{n\pi}{6}) \quad (13)$$

$$B_{ni} = A_{ni} \cdot (\frac{1}{2} + \frac{1}{\sqrt{3}} \cos \frac{n\pi}{6}) \quad (14)$$

### 3.2 换流器直流阻抗

基于文献[11]中所建立的 FCC 等效传统换流器 Graetz 桥电路模型, FCC 的交直流等值阻抗仍然可以按照典型的 6 脉动或 12 脉动换流系统进行分析计算<sup>[12]</sup>, 如图 6 所示。图中:  $e$  为交流电源;  $Z_c$  为换流变压器的换相电抗;  $Z_s$  为系统阻抗。

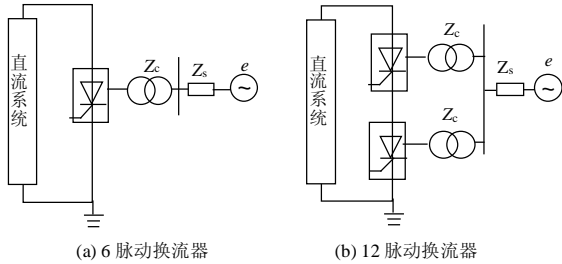


图 6 滤波换相整流系统简化图

Fig. 6 Simplified structure of the FCC system

换流器将交流三相电压变换为直流电压时对正、负序分量有不同的频率变化结果, 只考虑主要频率分量时有如下变换关系<sup>[13-14]</sup>

$$\begin{cases} f_{dc}^+ = f_{ac}^+ - f \\ f_{dc}^- = f_{ac}^- + f \end{cases} \quad (15)$$

式中  $f_0$  为系统工频。同理, 仅考虑主要频率分量时, 直流侧的谐波电流经换流器变换后在交流系统中呈现相序、频率不同的 2 种分量:

$$\begin{cases} f_{ac}^+ = f_{dc} + f \\ f_{ac}^- = f_{dc} - f_0 \end{cases} \quad (16)$$

由上述换流器对交流侧电压和直流侧电流的作用结果不难得出, 换流器直流侧某一频率的谐波电流最终会在直流侧产生同频的电压, 将它们比值定义为换流器的直流等值阻抗。对于 6 脉动换流器, 其直流等值阻抗计算式为

$$Z_{dc-6(\omega)} = \frac{9 \sin m}{\pi^2 m} [Z_{cs}(\omega - \omega_0) + Z_{cs}(\omega + \omega_0)] \quad (17)$$

式中:  $m$  为换相角;  $\omega_0$  为系统基频;  $Z_{cs}=Z_c+Z_s$ , 归算至换流变压器阀侧。

对于 12 脉波换流器, 其直流等值阻抗为

$$Z_{dc-12(\omega)} = \frac{18 \sin m}{\pi^2 m} [Z_{cs}(\omega - \omega_0) + Z_{cs}(\omega + \omega_0)] \quad (18)$$

### 3.3 换流器交流阻抗

由换流器对交流侧电压和直流电流的传变关系可以看出, 交流母线上某一频率的谐波电压最终在换流器口产生同频/同序的电流。对于 6 脉动换流器, 其正、负序交流等值阻抗的计算式为

$$Z_{ac-6(\omega)}^+ = \frac{\pi^2 m}{9 \sin m} (\frac{N_1}{N_2})^2 Z_{dc}(\omega - \omega_0) + Z_c(\omega) \quad (19)$$

$$Z_{ac-6(\omega)}^- = \frac{\pi^2 m}{9 \sin m} (\frac{N_1}{N_2})^2 Z_{dc}(\omega + \omega_0) + Z_c(\omega) \quad (20)$$

式中:  $N_1/N_2$  为换流变压器网侧和阀侧绕组匝数比。

对于 12 脉动换流器, 其正、负序交流等值阻抗分别为

$$Z_{ac-12(\omega)}^+ = \frac{\pi^2 m}{36 \sin m} (\frac{N_1}{N_2})^2 Z_{dc}(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2} Z_c(\omega) \quad (21)$$

$$Z_{ac-12(\omega)}^- = \frac{\pi^2 m}{36 \sin m} (\frac{N_1}{N_2})^2 Z_{dc}(\omega + \omega_0) + \frac{1}{2} Z_c(\omega) \quad (22)$$

## 4 算例分析

为有效推动新型滤波换相整流器的研究工作, 更好对 FCC 和 LCC 的阻抗频率特性进行对比分析, 根据直流输电系统自身特点, 建立直流输电研究开发平台, 如图 7 所示。图中主要系统参数为: 直流

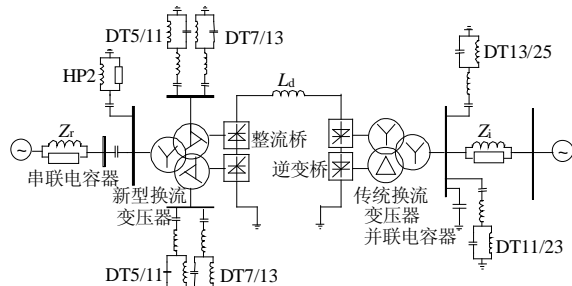


图 7 新型直流输电平台模型

Fig. 7 Platform model of new-type DC transmission

侧额定电压  $U_d=1000\text{ V}$ ，额定功率  $P_d=100\text{ kW}$ ，采用 12 脉波换流，单极接线；交流系统模拟无穷大电源，整流侧电源为  $420\text{ V}$ ，采用 FCC 系统，换流变压器二次绕组抽头接 DT5/7 和 DT11/13 两种双调谐滤波器，网侧绕组接二阶高通滤波器 HP2 及投切电容器；逆变侧采用传统换流器 LCC，网侧绕组接 DT11/13 双调谐滤波器、HP2 及投切电容器。

图 8 和图 9 分别表示了交流系统为无穷大 ( $Z_s=0\ \Omega$ ) 和短路比  $e_{\text{SCR}}=2.5$  时，平台模型下 FCC 与 LCC 的直流等值阻抗的仿真计算结果，由图可见，在相同频率下，FCC 的直流等值阻抗在 2 种工况下均比 LCC 有明显的降低。

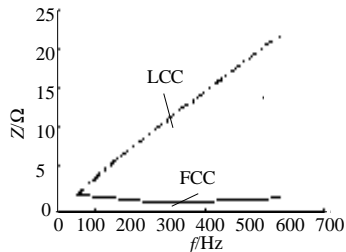


图 8 无穷大系统下 FCC 与 LCC 直流阻抗频率特性  
Fig. 8 Equivalent DC impedance-frequency characteristic of FCC and LCC with infinite AC system

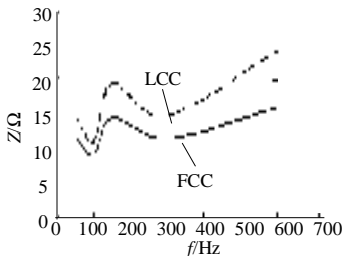


图 9  $e_{\text{SCR}}=2.5$  时 FCC 与传统换流器直流阻抗频率特性  
Fig. 9 Equivalent DC impedance-frequency characteristic of FCC and LCC for the  $e_{\text{SCR}}=2.5$  case

图 10 和图 11 分别表示在忽略换流器直流等值阻抗影响和计及其影响的条件下，交流侧母线的正序阻抗频率特性，结果表明 2 种情况下的交流等值阻抗存在着较大的区别。对于实验平台而言，忽略 LCC 的直流等值阻抗影响时交流母线在  $80\text{ Hz}$  附近存在着并联谐振，而计及 LCC 的直流等值阻抗影响时该频率点的阻抗值大大降低，如图 11 所示；采用 FCC 为换流器时，在忽略直流系统影响时交流母线并联谐振点的高频范围偏移至  $110\text{ Hz}$  附近，而计及直流系统影响时该频率点的阻抗值也大大降低，且阻抗值均比 LCC 情况有所降低，从而更好地避免了系统谐振现象的发生。

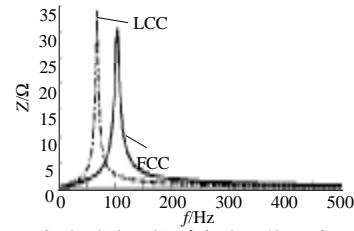


图 10 不计及直流系统阻抗时交流母线正序阻抗频率特性  
Fig. 10 Positive impedance-frequency characteristic at AC bus of FCC and LCC neglecting the DC influence

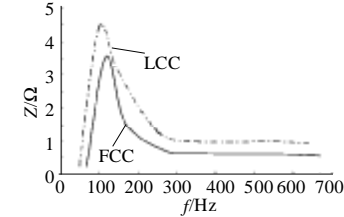


图 11 计及直流系统阻抗时交流母线正序阻抗频率特性  
Fig. 11 Positive impedance-frequency characteristic at AC bus of FCC and LCC considering the DC influence

## 5 结论

(1) 在同等传输容量的 HVDC 系统中，用 FCC 作换流器能够提高交流系统的有效短路比，增强系统的动态稳定性。

(2) 基于开关函数法，对 FCC 和 LCC 的交、直流等值阻抗的计算结果表明，换流器对交、直流系统的阻抗频率特性有较大的影响，尤其对系统谐振频率影响巨大。

(3) 在相同系统工况下，FCC 的交、直流等值阻抗均比 LCC 情况下明显降低，能够更有效地抑制直流输电谐波不稳定现象和系统谐振对直流输电系统的危害。

## 参考文献

- 余涛, 沈善德, 朱守真, 等. HVDC 及其控制系统动态稳定性的理论分析[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(12): 40-44.  
Yu Tao, Shen Shande, Zhu Shouzheng, et al. Analysis of the dynamic stability of HVDC and its control system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(12): 40-44(in Chinese).
- 周长春, 徐政. 由直流输电引起的次同步振荡的阻尼特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10): 6-9.  
Zhou Changchun, Xu Zheng. Damping analysis of subsynchronous oscillation caused by HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10): 6-9(in Chinese).
- 周群, 张益, 黄家裕. 非特征谐波引起的次同步振荡研究[J]. 电网技术, 1999, 23(12): 4-6.  
Zhou Qun, Zhang Yi, Huang Jiayu. Subsynchronous oscillation analysis in HVDC system-SSO caused by non-characteristic harmonics[J]. Power System Technology, 1999, 23(12): 4-6(in Chinese).
- Kurton R S. Modeling AC/DC systems for the analysis of AC/DC interactions[C]. Proceedings of IEEE Conference on Power Computing, New York, USA, 1995.
- Peter R. Harmonic voltage and current transfer, and AC- and DC-side

- impedances of HVDC converter[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(3): 2005-2009.
- [6] Wood A R, Arrillaga J. The frequency dependent impedance of an HVDC converter[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(3): 2005-2009.
- [7] 郝巍, 李兴源, 金小明, 等. 直流输电的谐波不稳定及其相关问题[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(19): 94-99.
- Hao Wei, Li Xingyuan, Jin Xiaoming, et al. A survey of harmonic instability and related problem caused by HVDC [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(19): 94-99(in Chinese).
- [8] 许加柱, 罗隆福, 李季, 等. 自耦补偿与谐波屏蔽换流变压器的接线方案和原理研究[J]. 电工技术学报, 2006, 21(9): 44-50.
- Xu Jiazhu, Luo Longfu, Li Ji, et al. Principle and connection scheme of self-coupled compensating and suppressing harmonic converter transformers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(9): 44-50(in Chinese).
- [9] 周长春, 徐政. 联于弱交流系统的 HVDC 故障恢复特性仿真分析[J]. 电网技术, 2003, 27(11): 18-21.
- Zhou Changchun, Xu Zheng. Simulation and analysis of recovery characteristics of HVDC connected to AC system with weak strength [J]. Power System Technology, 2003, 27(11): 18-21(in Chinese).
- [10] Szechtman M, Wess T, Thio C V. First benchmark model for HVDC control studies [J]. Electra, 1991, 135(4): 54-67.
- [11] 李季, 罗隆福, 许加柱, 等. 新型换流变压器及其滤波系统的数学模型与仿真计算[J]. 电工技术学报, 2007, 22(5): 45-52.
- Li Ji, Luo Longfu, Xu Jiazhu, et al. Mathematical model and simulation calculation of new-type converter transformer and its filtering system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(5): 45-52(in Chinese).
- [12] 戚庆茹, 焦连伟, 严正. 高压直流输电动态建模与仿真[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 28-32.
- Qi Qingru, Jiao Lianwei, Yan Zheng. Modeling and simulation of HVDC with dynamic phasors[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 28-32(in Chinese).
- [13] 李战鹰, 李建华, 夏道止.  $\pm 800\text{kV}$  特高压直流输电系统特征谐波分析[J]. 电网技术, 2006, 30(24): 6-9, 30.
- Li Zhanying, Li Jianhua, Xia Daozhi. Analysis of characteristic harmonics in  $\pm 800\text{kV}$  UHVDC power transmission system [J]. Power System Technology, 2006, 30(24): 6-9, 30(in Chinese).
- [14] Bathurst G N, Wood A R. Advanced modeling of the harmonic impedances of AC/DC converters[J]. IEE Transmission and Distribution, 2002, 149(6): 700-704.

收稿日期: 2007-09-08.

作者简介:

李季(1981—), 男, 博士研究生, 工程师, 从事直流输电新理论及其电气装备研究开发工作, E-mail: [edisonhunu@yahoo.com.cn](mailto:edisonhunu@yahoo.com.cn);

罗隆福(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 从事现代电器装备新技术研究及其优化设计工作和高压直流输电新理论研究;

许加柱(1980—), 男, 讲师, 从事直流输电新理论及其电气装备研究开发工作, E-mail: [xujiazhu02@hotmail.com](mailto:xujiazhu02@hotmail.com).

(责任编辑 马晓华)

(上接第 38 页 continued from page 38)

- [9] 马晋强, Lai L L, 杨以涵. 遗传算法在电力系统无功优化中的应用[J]. 中国电机工程学报, 1995, 15(5): 347-353.
- Ma Jintao, Lai L L, Yang Yihan. Application of genetic algorithm in reactive power optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 1995, 15(5): 347-353(in Chinese).
- [10] Han K H, Kim H J. Quantum-inspired evolutionary algorithm for a class of combinatorial optimization[J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 2002, 6(6): 580-593.
- [11] Hey T. Quantum computation: an introduction[J]. Computing & Engineering Journal, 1996, 10(3): 105-112.
- [12] 张勇军, 任震, 李邦峰. 电力系统无功优化调度研究综述[J]. 电网技术, 2005, 29(2): 50-56.
- Zhang Yongjun, Ren Zhen, Li Bangfeng. Surey on optimal reactive power dispatch of power systems[J]. Power System Technology, 2005, 29(2): 50-56(in Chinese).
- [13] 张勇军, 任震, 钟红梅, 等. 基于灾变遗传算法的无功规划优化[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(23): 29-32.
- Zhang Yongjun, Ren Zhen, Zhong Hongmei, et al. Cataclysmic genetic algorithms based optimal reactive power optimization[J]. Automation of Electric Power systems, 2002, 26(23): 29-32(in Chinese).
- [14] 张葛祥, 金炜东. 量子遗传算法的改进及其应用[J]. 西南交通大学学报, 2003, 38(6): 717-722.
- Zhang Gexiang, Jin Weidong. Improvement of quantum genetic algorithm and its application[J]. Journal of Southwest Tiaotong University, 2003, 38(6): 717-722(in Chinese).
- [15] 张葛祥, 李娜, 金炜东, 等. 一种新量子遗传算法及其应用[J]. 电子学报, 2004, 32(3): 476-479.
- Zhang Gexiang, Li Na, Jin Weidong, et al. A novel quantum genetic algorithm and its application[J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(3): 476-479(in Chinese).
- [16] Zhang Gexiang, Rong Haina, Jin Weidong. An improved quantum-inspired genetic algorithm and its application to time-frequency atom decomposition[J]. Dynamics of Continuous, Discrete & Impulsive Systems, 2007, 14: 764-771.
- [17] 王洪章, 熊信良, 吴耀武. 基于改进 Tabu 搜索算法的电力系统无功优化[J]. 电网技术, 2002, 26(1): 15-18.
- Wang Hongzhang, Xiong Xinyin, Wu Yaowu. Power system reactive power optimization based on modified Tabu search algorithm [J]. Power System Technology, 2002, 26(1): 15-18(in Chinese).
- [18] 娄素华, 伍耀武, 彭磊, 等. 量子进化算法在电力系统无功优化中的应用[J]. 继电器, 2005, 33(18): 30-35.
- Lou Suhua, Wu Yaowu, Peng Lei, et al. Application of quantum-inspired evolutionary algorithm in reactive power optimization[J]. Relay, 2005, 33(18): 30-35(in Chinese).
- [19] Wu Q H, Cao Y J. Optimal reactive power dispatch using an adaptive genetic algorithm[J]. Electrical Power & Energy Systems, 1998, 20(8): 563-569.
- [20] Lai L L, Ma J T. Application of programming to reactive power planning comparison with nonlinear programming approach[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(1): 198-204.
- [21] Das D B, Patvardhan C. Reactive power dispatch with a hybrid stochastic search technique[J]. Electric Energy System, 2002, 24(9): 731-736.

收稿日期: 2008-01-05.

作者简介:

刘红文(1982—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与规划, E-mail: [hongwenliu@163.com](mailto:hongwenliu@163.com);

张葛祥(1974—), 男, 博士, 教授, 研究方向为量子进化计算、模式识别等。

(编辑 杜宁)