

基于状态空间平均法的新型高压直流输电系统稳态建模分析

孙 栩^{1,2}, 孔 力¹

(1. 中国科学院电工研究所, 北京 100080; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100080)

Research on Novel HVDC Transmission System with Active Filter Function

SUN Xu^{1,2}, KONG Li¹

(1. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China;

2. Graduate School of Chinese Academy Science, Beijing 100080, China)

摘要: 运用状态空间平均法对新型高压直流输电系统进行分析,建立了新型高压直流输电系统的模型。并在开关函数的基础上进行傅立叶变换,通过忽略高次部分,在建模过程中,用开关函数来表示阀的开关状态,其状态组合可以表示整个电压源型换流器的状态,从而可以考虑换流器的自换相过程。结果表明,新型高压直流输电技术具有良好的性能。

关键词: 高压直流输电; 电压源型换流器; 建模; 状态空间平均法; 开关函数

中图分类号: TM721.1 文献标志码: A

Abstract: This paper analyses the basic principle of the novel high voltage direct current transmission system, and establishes a mathematical model. The control mode with which the novel HVDC system combines transferring power and compensating harmonic is analyzed through instantaneous reactive power theory when the system is connected to the low voltage grid containing phase-controlled rectifier device that bring a great deal of harmonic. Finally, the feasibility of the method is verified by a prototype.

Key words: high voltage direct current(HVDC); voltage source converter; harmonic; active power filter; instantaneous reactive power theory

0 引言

近年来,高压直流输电技术在世界范围内得到了广泛的使用,其应用方向主要有两个:远距离大容量地传输功率和大电网间的非同步联网。但是高压直流输电技术本身也存在着缺点,即它的换相方式是传统的电网换相,所用电力电子器件是半控型的晶闸管,在接入弱系统即短路比 SCR 比较低的时候(一般认为小于 2.5),有可能发生换相失败问题,导

致直流系统的非正常运行,当然更不能向无源网络供电。此外,由于自身结构的问题,在运行过程中,高压直流输电系统要向交流电网吸收大量的无功功率,同时向交流电网注入大量的谐波,这些不但影响了整个系统的性能,而且加大了整个投资。现在开展了许多研究以解决这些问题,最根本的解决方案是利用可关断电力电子器件作为直流输电的换流阀,用自换相方式替代电网换相方式,这种直流输电方式称之为新型高压直流输电。

新型高压直流输电系统是由两个对称的电压源型换流器 VSC 通过直流线路及其电容连接而成的,对它进行准确而有效的建模具有很重要的意义。状态空间平均法是现有电路建模方法的基础,许多建模方法都由它衍生或建立在它基础之上,状态空间平均法所得结果是其它方法的首阶近似。所以利用状态空间平均法建模对于正确认识、分析、控制电路都具有很强的指导意义。笔者即利用状态空间平均法对新型高压直流输电系统进行建模分析^[1-5]。

1 新型高压直流输电系统基本原理

新型高压直流输电系统是由变压器和通过直流电容器以及直流线路耦合在一起的两个电压源换流器(VSC₁和VSC₂)组合而成的,两个电压源换流器均通过变压器并联接入两个系统(即可以是交流电网,还可以是风力发电机等电源,甚至其中一个可以是纯粹的无源负载)。其三相电路见图1。

直流侧的并联电容器为VSC提供电压支撑,缓冲桥臂关断时的冲击电流,减小直流侧谐波;换流变压器为VSC的运行提供换能电抗,是VSC与交流侧能量交换的纽带同时也起到隔离和滤波的作用。

收稿日期: 2007-05-18; 修回日期: 2007-07-19

作者简介: 孙 栩(1978-),男,博士研究生,主要研究方向为 HVDC、风力发电及分布式发电系统。

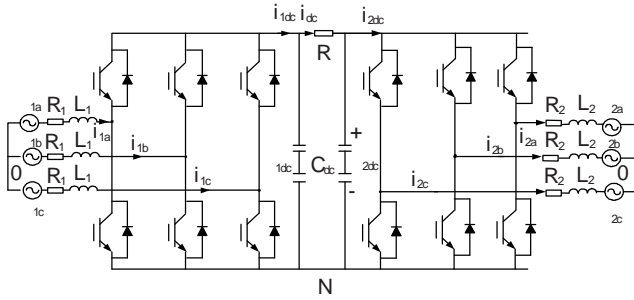


图 1 新型高压直流输电系统的三相电路图

为了分析新型高压直流输电系统的稳态工作特性,以左端为例,设左端有源交流网络母线基波相量 U_{S1} 幅值为 U_{S1} , VSC 交流侧电压基波 U_{C1} 幅值为 U_{C1} , U_{S1} 与 U_{C1} 间相角差为 φ_1 , 换流变压器电抗值为 $X_1 = L_1$, 若忽略换流变压器损耗则 VSC 从左端有源交流网络吸收的有功功率及无功功率满足

$$P_{S1} = \frac{U_{S1} U_{C1}}{X_1} \sin \varphi_1 \quad (1)$$

$$Q_{S1} = \frac{U_{S1} (U_{C1} \cos \varphi_1 - U_{S1})}{X_1} \quad (2)$$

若 U_{C1} 相位滞后 U_{S1} , 则 VSC 工作在整流状态, 从左端网络吸收有功功率; 若 U_{C1} 相位超前 U_{S1} , 则 VSC 工作在逆变状态, 向左端网络注入有功功率。由式(1)、(2)可知, P_{S1} 的变化主要受 φ_1 变化的影响, 而 Q_{S1} 的变化主要受 U_{C1} 变化的影响, 两者耦合很弱。因此可用 φ_1 来控制 P_{S1} , 而用 U_{C1} 来控制 Q_{S1} 。

在新型高压直流输电系统正常运行过程中, 必须对直流侧电压进行控制, 使其恒定。若直流线路电流恒定, 直流侧电压变化量将正比于有功功率的不平衡量, 则定直流电压控制和定有功功率控制将是等效的。所以新型高压直流输电系统一端采用定直流电压控制, 同时, 另一端采用定直流电流控制, 则两端 VSC 通过分别检测各侧的直流电压或直流电流进行相应控制, 而不必通过两端之间的通讯, 即可实现两端交流有源网络之间传输定直流电流控制端指定的有功功率量, 这有利于远距离高压直流输电系统的可靠运行。对于两端无功功率的调整量, 可根据各端交流有源网络对各自无功功率的需求, 分别由各端 VSC 独立进行控制^[6-9]。

2 新型高压直流输电系统的稳态建模

2.1 新型高压直流输电系统的开关函数表示

为了对含电力电子元件的装置进行状态空间平均法建模, 在下面的分析中引入开关函数的方法。

对于一个 PWM 控制下的变换器, 同一桥臂的两个开关器件交替导通, 其开关函数 S 定义如下: $S=1$, 代表对应桥臂中的上管导通, 下管关断; $S=0$, 代表对应桥臂中的下管导通, 上管关断。

以 VSC1 的 a 相为例, 可推知若系统三相平衡, 则

$$N_0 = -\frac{1}{3} U_{1dc} \sum_{j=a,b,c} S_{ij} \quad (3)$$

根据基尔霍夫电压、电流定律, 并引入开关函数方法, 可以得到关于 VSC1 的一组方程式

$$\begin{cases} L_1 \frac{di_{1a}}{dt} = -(R_1 + R_s) i_{1a} - U_{1dc} S_{1a} + \frac{U_{1dc}}{3} \sum_{j=a,b,c} S_{ij} + U_{1a} \\ L_1 \frac{di_{1b}}{dt} = -(R_1 + R_s) i_{1b} - U_{1dc} S_{1b} + \frac{U_{1dc}}{3} \sum_{j=a,b,c} S_{ij} + U_{1b} \\ L_1 \frac{di_{1c}}{dt} = -(R_1 + R_s) i_{1c} - U_{1dc} S_{1c} + \frac{U_{1dc}}{3} \sum_{j=a,b,c} S_{ij} + U_{1c} \end{cases} \quad (4)$$

式中 R_s 代表电力电子器件的损耗。

在一个系统基波周期内, 开关函数表现为不断的导通和关断状态, 且导通与关断的时间随着 PWM 的调制而变化。以 VSC1 的 a 相为例, 由面积等效原理可知, 在一个开关周期 ($1/\omega_s$) 内, 可以求得此周期内的开关函数 S_{1a} 的平均值, 进而可以求得 S_{1a} 在整个系统的基波周期 ($1/\omega$) 内的平均值, 即基波周期内的一条连续阶梯形曲线, 根据傅立叶分解的原则, 可以得到 S_{1a} 的基波交流分量

$$d_{1a} = 0.5 + \frac{m_1}{2} \cos(\omega t - \varphi_1) \quad (5)$$

同理可得 b 相和 c 相的开关函数基波交流分量

$$d_{1b} = 0.5 + \frac{m_1}{2} \cos(\omega t - \varphi_1 - \frac{2}{3}) \quad (6)$$

$$d_{1c} = 0.5 + \frac{m_1}{2} \cos(\omega t - \varphi_1 - \frac{4}{3}) \quad (7)$$

其中 m_1 和 φ_1 分别为换流器的调制比和触发角。

将式(5)~(7)代入式(4), 可得新型高压直流输电系统交流部分的动态方程 (以 VSC1 为例, VSC2 同理)

$$\begin{cases} L_1 \frac{di_{1a}}{dt} = -(R_1 + R_s) i_{1a} - \frac{m_1}{2} U_{1dc} \cos(\omega t - \varphi_1) + U_{1a} \\ L_1 \frac{di_{1b}}{dt} = -(R_1 + R_s) i_{1b} - \frac{m_1}{2} U_{1dc} \cos(\omega t - \varphi_1 - \frac{2}{3}) + U_{1b} \\ L_1 \frac{di_{1c}}{dt} = -(R_1 + R_s) i_{1c} - \frac{m_1}{2} U_{1dc} \cos(\omega t - \varphi_1 - \frac{4}{3}) + U_{1c} \end{cases} \quad (8)$$

另外, 可得到直流电容器动态方程为

$$C_{dc} \frac{d(U_{1dc} + U_{2dc})}{dt} = i_{1dc} - i_{2dc} = \sum_{j=a,b,c} (i_{1j} d_{1j} - i_{2j} d_{2j}) \quad (9)$$

综上所述, 式(8)、(9)就是新型高压直流输电系统的开关函数^[10-14]。

2.2 新型高压直流输电系统状态空间平均法建模

上面开关函数模型是一组对时间不连续的微分方程组, 普通的数学方法难以求得解析解, 造成不连续的原因在于开关函数的不连续。当开关频率很高时, 状态空间平均法 (SSA 法) 是解决问题的一种行之有效的方法, 可以用开关函数在一个开关周期内的平均值代替函数本身, 得到对时间连续的状态

空间平均模型。利用状态空间平均法建模对于正确认识、分析、控制电路都具有很强的指导意义。状态空间平均法是从换流器不同拓扑结构下的状态空间方程出发,经过平均-小信号扰动-线性化处理,得到表征换流器稳态特性的数学模型,并可得到电路模型。其物理意义明显,使用起来较为方便。可以应用波特图方便地对系统进行分析和校正。状态空间平均法在建模过程中将开关器件理想化,即忽略它们的正向导通压降和反向漏电流,同时认为状态转换是瞬间完成的,即非通即断,在任何时刻只是两个状态中的一个。

假设一个系统的状态方程为

$$\begin{cases} pX=A_1X+B_1E & \text{当 } (n-1)T < t < (n-1)T+dT \\ pX=A_2X+B_2E & \text{当 } (n-1)T+dT < t < nT \end{cases} \quad (10)$$

式中 X 为状态矢量; E 为输入矢量; A_1, A_2 分别为不同时刻的系统矩阵; B_1, B_2 分别为不同时刻的输入矩阵。

在时间段 $(n-1)T < t < nT$ 内利用 SSA 法对系统作平均,得到连续化后的系统状态方程为

$$pX=[dA_1+(1-d)A_2]X+[dB_1+(1-d)B_2]E \quad (11)$$

由于在不同开关状态下,系统的输入矩阵相同,所以只要利用 SSA 法对系统矩阵 A 求平均即可。假设在某一个开关周期内三相的开关函数的波形见图 2。图中 T_s 为开关周期, d_a, d_b, d_c 分别为各相开关函数的占空比,由于开关函数关于开关周期中线对称,所以只需要分析半个周期。

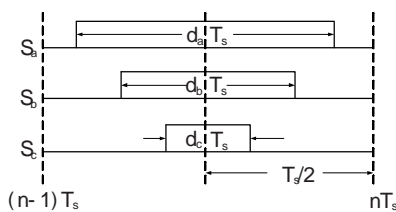


图 2 三相开关函数波形图

从图中可以看到,在一个开关周期内存在四种开关状态,它们所对应的时间以及状态下的系统矩阵的表达式均不相同。利用 SSA 法对这些表达式进行整理合并,求得的连续系统矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 & 0 & -\frac{1}{3L}(2d_a - d_b - d_c) \\ 0 & -\frac{R}{L} & 0 & -\frac{1}{3L}(2d_b - d_a - d_c) \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L} & -\frac{1}{3L}(2d_c - d_a - d_b) \\ \frac{d_a}{C_{cb}} & \frac{d_b}{C_{cb}} & \frac{d_c}{C_{cb}} & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

这样就得到了换流器在静止 abc 坐标下的稳态数学模型为

$$pX=AX+BE \quad (13)$$

式中 $p=d/dt$ 为微分算子; $X=[i_a \ i_b \ i_c \ u_{cd}]^T$; $E=[e_a \ e_b \ e_c \ i_{cd}]^T$; A 见式(12)。

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{C_{cb}} \end{bmatrix}$$

当开关频率足够高时,可以认为占空比函数为连续函数,这样换流器就变成了一个连续系统。

虽然系统具有连续性,但依然具有时变性,对这样的时变系统进行分析控制是比较困难的。为了解决这一问题,可以通过坐标变换,将静止 abc 坐标系下系统的状态方程转换到 dq 坐标系下,便可以得到一个时不变系统。

首先将 abc 坐标系下的变量转换到 $\alpha\beta$ 坐标系下,其转换矩阵为

$$T_{\alpha\beta/abc} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (14)$$

然后再将 $\alpha\beta$ 坐标系下的变量转换到 dq 坐标系下,其转换矩阵为

$$T_{dq/\alpha\beta} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos & \sin \\ -\sin & \cos \end{bmatrix} \quad (15)$$

由此得到 abc 坐标系到 dq 坐标系的转换矩阵为

$$T_{dq/abc} = \begin{bmatrix} \cos & -\frac{1}{2}\cos + \frac{\sqrt{3}}{2}\sin & -\frac{1}{2}\cos - \frac{\sqrt{3}}{2}\sin \\ -\sin & \frac{1}{2}\sin + \frac{\sqrt{3}}{2}\cos & \frac{1}{2}\sin - \frac{\sqrt{3}}{2}\cos \end{bmatrix} \quad (16)$$

转换以后系统的数学模型为

$$pX=AX+BE \quad (17)$$

式中 $X=[i_d \ i_q \ u_{cd}]^T$; $E=[e_d \ e_q \ i_{cd}]^T$;

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{d_q}{L} \\ - & -\frac{R}{L} - \frac{d_q}{L} \\ \frac{3d_d}{2C_{cb}} & \frac{3d_q}{2C_{cb}} & 0 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{C_{cb}} \end{bmatrix}$$

至此,已经得到了换流器在 dq 坐标系下的稳态数学模型,可以看到,经过坐标变换,原本的时变系统变为了定常系统,问题分析变得更加简单^[15]。

3 实验分析

为了验证以上理论分析的正确性,笔者根据图 1 搭建了一个试验样机。主要元件型号及参数如下:以 DSP(TMS320LF2407A) 为核心的中央控制电路;IPM 模块 PM300DSA120 为功率开关器件;两端的

交流电感 $L_s=4\text{ mH}$, 内阻 $R_s=0.2\ \Omega$; 每个直流电容选用 6 只 HEC 400 WV(3 300 μF , 额定电压 400 V) 的电解电容, 两个 3 只并联组串联而成, 所以总 $C_{dc}=4\ 950\ \mu\text{F}$; 直流线路电阻 $R=1.6\ \Omega$; 调压器输出的三相电网电压约为 100 V, 直流母线电压给定值为 210 V。

为了测试新型高压直流输电系统的基本性能, 对实验装置进行了有功和无功调节实验。

3.1 单位功率因数时的情况

在该情况下, 实测的整流器交流侧电流 9.32 A, 有功功率 1630 W, 无功功率 0 Var, 视在功率 1630 VA, 功率因数为 1。图 3(a) 为传递纯有功功率时整流器交流侧 a 相电网电压和 a 相电流的波形图, b、c 相波形图与 a 相类似, 只是在相位上相差 120° 。从波形图可以看出, 逆变器向电网输出正弦度很好的电流, 功率因数控制在较为理想的对称度。通过电能质量分析仪对逆变器输出电流进行分析, 电流总谐波畸变率(THD)仅为 0.9%。

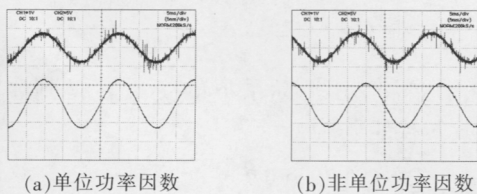


图3 单位功率因数与非单位功率因数时整流器交流侧电压电流波形

3.2 非单位功率因数时的情况

在这种情况下, 实测的整流器交流侧电流 7.39 A, 有功功率 1 020 W, 无功功率 980 Var, 视在功率 1 415 VA, 功率因数为 0.721, 电流的总谐波畸变率 $\text{THD}=1.4\%$, 图 3(b) 为同时传递有功功率和无功功率时整流器交流侧 a 相电网电压和 a 相电流的波形图。

4 结语

笔者利用状态空间平均法对新型高压直流输电系统进行了建模分析, 建立了新型高压直流输电系统的稳态模型, 证明其有功功率和无功功率可以实现解耦, 即由 dq 坐标系下 i_d 和 i_q 独立控制, 并在

此基础上搭建了实验装置进行了验证, 结果同理论分析相一致, 表明新型高压直流输电技术具有良好的性能, 在不久的将来必将获得更广泛的应用。

参考文献:

- [1] 王凤川. 电压源换流器式轻型高压直流输电 [J]. 电网技术, 1999, 23(4): 74-76.
- [2] ASPLUND G, ERIKSSON K. DC Transmission Based on Voltage Source Converters [C]// CIGRE, SC14 Colloquium, South Africa, 1997: 213-218.
- [3] WANG Xiao, OOI B T. High Voltage Direct Current Transmission System Based on Voltage Source Converters[J]. Proceeding of PESC 90 Record, San Antonio (TX, USA): 1990(1): 325-332.
- [4] WEIMERS L. HVDC Light: a New Technology for a Better Environment[J]. IEEE Power Engineering Review, 1998, 18(8): 19-20.
- [5] SZUKI HIROKAZU, AAJIMA TATSUJITO. Development and Testing of Prototype Models for a High-performance 300 MW Self-commuted AC/DC Converter [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1997, 12(4): 1589-1597.
- [6] 文俊, 张一工, 韩民晓, 等. 轻型直流输电——一种新一代的 HVDC 技术[J]. 电网技术, 2003, 27(1): 47-51.
- [7] 李永坚, 周有庆, 宋强. 轻型直流输电(HVDC Light)技术的发展与应用[J]. 高电压技术, 2003, 29(10): 26-28.
- [8] 张桂斌, 徐政, 王广柱. 基于 VSC 的直流输电系统的稳态建模及其非线性控制[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(1): 17-22.
- [9] 刘洪涛, 徐政. 基于三电平电压源换流器的高压直流输电系统的控制策略研究 [J]. 电工技术学报, 2003, 18(3): 102-106.
- [10] 李庚银, 吕鹏飞, 李广凯, 等. 轻型高压直流输电技术的发展与展望[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(4): 77-81.
- [11] 马林, 俞晓荣, 苏宏营, 等. 电压源型 AC/DC 换流器的运行机理和特性分析[J]. 继电器, 2002, 30(10): 47-50.
- [12] 李勋, 杨荫福, 陈坚. 基于 SPWM 控制的 UPFC 开关函数数学模型[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(9): 37-40.
- [13] 孙元章, 刘前进. FACTS 控制技术综述——模型、目标与策略[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(6): 1-7.
- [14] 刘洪涛, 徐政. 基于三电平电压源换流器的高压直流输电系统的控制策略研究[J]. 电工技术学报, 2003, 18(3): 102-106.
- [15] 张加胜, 冯兴田. 高功率因数整流器的建模及控制算法研究 [J]. 电力电子技术, 2004, 28(5): 74-76.

第6届输配电技术国际会议召开

简讯

由中国电力企业联合会主办的第6届输配电技术国际会议于2007年11月10日~12日在广州白云国际会议中心举行。会议的支持单位为国家电网公司、中国南方电网有限责任公司、香港中华电力有限公司。参会的主要领导有中国电力企业联合会常务副理事长谢振华、中国电力企业联合会秘书长王永干、国家电力监管委员会输电监管部主任么虹、国家电网公司总经理杜志刚、中国南方电网有限责任公司副总经理祁达才、中国南方电网广东电网公司总经理吴周春等, 还特别邀请中国科学院卢强院士、国电信息中心李东副主任和ABB(中国)有限公司、西门子(中国)有限公司、阿海珐输配电、施耐德电气(中国)投资有限公司、香港中华电力有限公司等有关部门的负责人以及中国电力企业联合会供电分会会长、副会长等单位的嘉宾, 参会的还有全国各电力公司、供电局(电业局)、电试所(院)、制造企业和有关高等院校的代表共计700多人。