

带有源滤波功能的新型高压直流输电系统的研究

孙 栩^{a,b}, 孔 力^a

(中国科学院 a. 电工研究所; b. 研究生院, 北京 100080)

摘要: 针对传统高压直流输电技术存在的一些缺点, 笔者首先介绍了新型高压直流输电系统的基本原理, 并建立其稳态的数学模型, 然后以新型高压直流输电系统接入含有会产生大量谐波的相控整流设备的低压电网为例, 通过瞬时无功功率理论, 分析了新型高压直流输电系统功率传递和谐波补偿相结合的控制算法。最后通过试验样机进行了验证, 证明了该方法的可行性。

关键词: 高压直流输电; 电压源型换流器; 谐波; 有源滤波; 瞬时无功功率理论

中图分类号: TM721.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2008)01-0001-03

Research of Novel HVDC System with Active Filter Function

SUN Xu^{a,b}, KONG Li^a

(Chinese Academy of Science a. Institute of Electrical Engineering;
b. Graduate School of Chinese Academy Science, Beijing 100080, China)

Abstract: Aiming at the shortcomings of the traditional HVDC, the author introduced the basic principle of the new HVDC transmission system firstly, and established its steady-state mode. Then, the author analyzed the control mode in which the novel HVDC system combine transferring power and compensating harmonic through instantaneous reactive power theory when it connects to the low voltage grid containing phase commute rectifier device that bring a great deal harmonic. Finally, this method's feasibility is validated by the examination.

Key words: HVDC; voltage source converter; harmonic; active power filter; instantaneous reactive power theory

0 引言

近几十年来, 高压直流输电技术在世界范围内得到了广泛的应用, 但同时它也有着许多缺点, 如需要大量的无功补偿装置、产生大量的谐波污染和在接入弱交流系统时会产生换相失败等问题。产生这些问题的关键是传统的高压直流输电系统使用的是以晶闸管为换流阀的电流源换流器, 在换相时只能是电网换相。随着大功率自关断电力电子器件的发展, 新型高压直流输电技术应运而生。这种技术采用电压源换流器作为换流电路, 可以接入弱交流系统甚至是无源网络, 方式极为灵活, 因为其有功功率和无功功率可以相互独立控制, 且由于使用 PWM 调制技术, 只会产生少量高次谐波, 所需滤波装置极其有限甚至可以忽略。

相对于传统高压直流输电系统只应用于远距离大功率传送能量和非同步交流电网的互联, 新型高压直流输电系统的使用范围更加广泛。他不但可以完成传统高压直流输电系统的功能, 还可以应用于

风能等可再生能源并网、向无源网络供电以及城市配电系统等。由于新型高压直流输电系统应用范围很广, 所以它所接入系统的情况更加复杂, 比如可能接入低压电网等, 就存在由负载引起的谐波或不对称等电能质量问题。新型高压直流输电系统所采用的灵活的控制方法, 在传送有功功率和无功功率的同时, 不但不会对所接入电网造成损害, 而且还会利用自己的优异性能, 改善电网的运行状况。

笔者首先介绍了新型高压直流输电系统的基本原理, 并建立其稳态的数学模型, 然后以新型高压直流输电系统接入存在大量谐波的低压电网为例, 介绍了应用瞬时无功功率理论在新型高压直流输电系统中附加有源滤波功能的控制方法, 并以试验样机证明了方法的可行性^[1-4]。

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换能电抗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换能电抗并联接入两个系统(既可以是交

收稿日期: 2007-04-12; 修回日期: 2007-09-14

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。

流电网,也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。

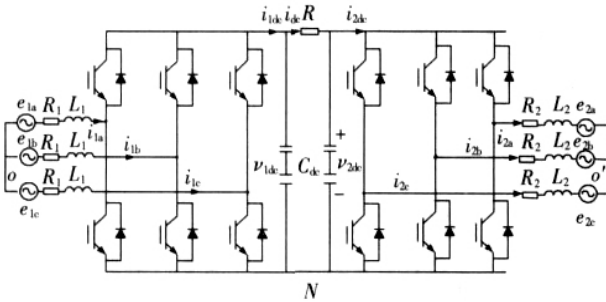


图 1 新型高压直流输电系统的三相电路图

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。

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 E_{s1} 幅值为 E_{s1} , VSC 交流侧电压基波 U_{c1} 幅值为 U_{c1} , E_{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

$$P_{s1} = \frac{E_{s1} U_{c1}}{X_1} \sin \varphi_1; Q_{s1} = \frac{E_{s1} (U_{c1} \cos \varphi_1 - E_{s1})}{X_1}$$

若 U_{c1} 相位滞后 E_{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 E_{s1} , 则 VSC 工作在逆变状态,向左端网络注入有功功率。

2 新型高压直流输电系统的稳态建模

新型高压直流输电系统可以认为是由两个对称的电压源型换流器组合而成的,所以建立电压源型换流器的稳态数学模型是极其必要的。

在建立电压源型换流器的数学模型时,作如下假设:①网侧三相滤波电抗为线性元件,且不考虑饱和;②不计开关损耗;③三相电网电压为平稳的正弦波,瞬时值表达式为

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_m \cos(\omega t) \\ E_m \cos(\omega t - 120^\circ) \\ E_m \cos(\omega t + 120^\circ) \end{bmatrix}$$

以左端换流器 VSC_1 为例,可知其直流电流为:

$$i_{1d} = i_{1a} d_{1a} + i_{1b} d_{1b} + i_{1c} d_{1c}$$

换流器 VSC_1 交流输出电压为

$$v_{1a} = U_{dc} d_{1a}; v_{1b} = U_{dc} d_{1b}; v_{1c} = U_{dc} d_{1c}$$

根据图 1 所示,可得换流器 VSC_1 在三相静止 abc 坐标系下的稳态数学模型

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{1a} \\ i_{1b} \\ i_{1c} \end{bmatrix} = \frac{1}{L_1} \begin{bmatrix} d_{1a} \\ d_{1b} \\ d_{1c} \end{bmatrix} U_{dc} - \frac{1}{L_1} \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} - \frac{R}{L_1} \begin{bmatrix} i_{1a} \\ i_{1b} \\ i_{1c} \end{bmatrix}$$

三相静止坐标下的数学模型具有物理意义清

晰、直观的特点。但是在这种模型中,交流侧均为时变的交流量,不利于控制系统的设计。通过坐标变换可以将三相静止坐标系转换成与电网基波频率同步旋转的两相坐标系。坐标变换以后,三相静止坐标系下的基波正弦量都将变换为同步旋转坐标下的直流量,从而可以简化控制系统的设计。坐标变换矩阵为

$$T = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos t & \cos(t - \frac{2}{3}) & \cos(t + \frac{2}{3}) \\ -\sin t & -\sin(t - \frac{2}{3}) & -\sin(t + \frac{2}{3}) \end{bmatrix} \quad (1)$$

通过式(1),可以得到同步旋转坐标系下换流器 VSC_1 的稳态数学模型

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{1d} \\ i_{1q} \end{bmatrix} = \frac{1}{L_1} \begin{bmatrix} d_{1d} \\ d_{1q} \end{bmatrix} U_{dc} - \begin{bmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{1d} \\ i_{1q} \end{bmatrix} - \frac{1}{L_1} \begin{bmatrix} e_{1d} \\ e_{1q} \end{bmatrix} - \frac{R}{L_1} \begin{bmatrix} i_{1d} \\ i_{1q} \end{bmatrix} \quad (2)$$

以上分析是以左端换流器 VSC_1 为例说明的,左端换流器 VSC_2 的分析同理^[5,6]。

3 有源滤波器(APF)系统构成原理

APF 是一种动态无功补偿和抑制谐波的新型电力电子补偿器,由静态功率变流器构成,具有电力电子变流器的高可控性和快速响应性。与无源滤波器的最大区别在于它能主动向交流电网注入补偿电流,补偿电流的幅值与负载流入电网的谐波电流大小相等,相位差 180° ;从而抵消负载所产生的谐波电流。APF 能有效地解决无源滤波器存在的不足,是电力系统无功补偿、谐波治理的发展方向。

图 2 为最基本的并联型电力有源滤波器构成原理图。图中, E_s 表示交流电网电压,负载为非线性负载,它产生谐波并消耗无功功率。电力有源滤波器系统主要由两大部分组成,即指令电流运算电路和补偿电流发生电路(由电流跟踪控制电路、驱动电路和主电路 3 部分构成)。

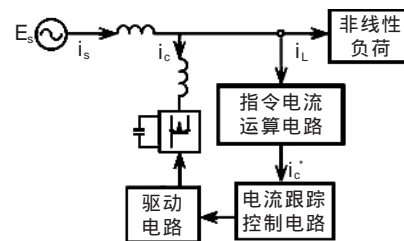


图 2 有源滤波器系统构成原理图

根据瞬时无功功率理论,指令电流运算电路的功能主要是从负载电流 i_L 中分离出谐波电流分量 i_{Lh} 和基波无功电流 i_{Lq} , 然后将其反极性作为补偿电流指令信号 $i_c^* = -(i_{Lh} + i_{Lq})$ 。电流跟踪控制电路的功能是根据主电路产生的补偿电流 i_c 跟踪 i_c^* 的原则,计算出主电路各开关器件的触发脉冲,此脉冲经驱动电路后作用于主电路,产生补偿电流 i_c 。由于 i_c

$-(i_{Lh}+i_{Lq})$, 所以可知 $i_s=i_L+i_c$ $i_L-(i_{Lh}+i_{Lq})=i_{Lq}$

即电源电流 i_s 中只含有基波的有功分量 i_{Lq} , 从而达到消除谐波、补偿无功的目的^[7-9]。

4 带有源滤波功能的新型高压直流输电系统的原理结构及其控制方法

考虑到新型高压直流输电系统与电压型的 APF 在结构上有很多相似之处, 都是以电压源型换流器作为基本的结构, 可以通过适当控制策略使新型高压直流输电系统和交流电网传递功率的同时实现 APF 功能, 即同时向电网提供所需要的谐波电流和无功功率, 可以实现谐波和无功功率就近补偿。

该系统以新型高压直流输电系统接入含有会产生大量谐波的相控整流设备的低压电网为例, 其结构简图见图 3。

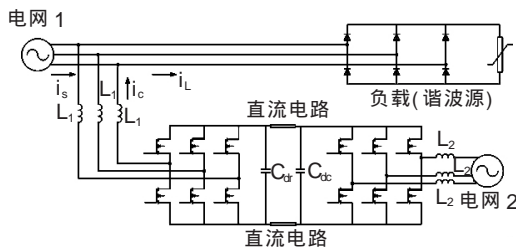


图3 新型高压直流输电系统实现有源滤波功能原理图

从式(2)可以看出, 电压源型换流器的 d、q 轴变量相互耦合, 所以为解除耦合采用带前馈解耦的 PI 电流控制策略, 其结构见图 4。

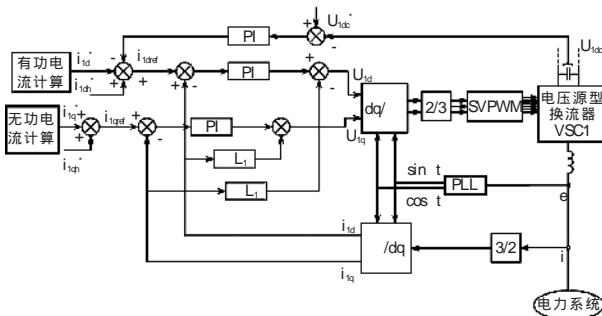


图4 带有源滤波功能的新型高压直流输电系统的控制框图

在图4中, d、q 轴的参考电流 i_{1dref} 、 i_{1qref} 分别为

$$i_{1dref}=i_{1d}^*+i_{1dh}^*-(k_p+\frac{k_i}{s})(U_{1dc}^*-U_{1dc}); i_{1qref}=i_{1q}^*+i_{1qh}^*$$

其中 i_{1dh}^* 、 i_{1qh}^* 为电网中需要补偿的谐波电流的 d 轴和 q 轴参考值; i_{1d}^* 、 i_{1q}^* 为新型高压直流输电系统根据自身情况或电网调度要求和电网交换的有功、无功功率电流参考值; $(k_p+k_i/s)(U_{1dc}^*-U_{1dc})$ 为稳定直流电压加入的 d 轴参考值。

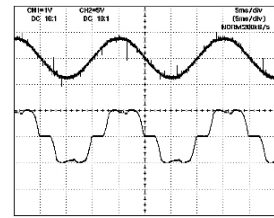
以上分析说明, d 轴参考电流 i_{1dref} 包括有功电流 i_{1d}^* 参考值、电网中需要补偿的 d 轴谐波电流的 i_{1dh}^* 参考值和直流电压外环加入的 d 轴参考值。q 轴参考电流 i_{1qref} 包括无功电流 i_{1q}^* 参考值、电网中需要

补偿的 q 轴谐波电流的 i_{1qh}^* 参考值。采用直接电流控制, 换流器交流电流完全追随参考电流变化时, 就可以完成有功功率、无功功率和谐波三者的协调控制, 实现在传递功率的同时完成有源滤波的功能。

5 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; 测量电压选用的模块为 LP-28 型电压传感器, 测量电流选用的是 LT58-7S 型电流传感器, 其精度分别为 $\pm 0.6\%$ 和 $\pm 0.8\%$, 线性度 $< 0.2\%$; 同步锁相所用的电压互感器为 SPT204A, 线性度 $< 0.1\%$; 两端的交流电感 $L_s=4\text{mH}$, 内阻 $R_s=0.2$; 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 $C_{dc}=4 950\ \mu\text{F}$; 直流通路等效电阻 $R=1.6$; 调压器输出的三相电网线电压约为 100 V, 直流母线电压给定值为 210 V; 谐波负载为二极管整流桥所接电阻箱, 其电阻约为 39 Ω 。

首先研究新型高压直流输电系统不接入电网时的情况。该情况下电网电压为 103.0 V, 图 5 为电网 a 相电压和谐波负载 a 相电流 i_{La} 波形, 其中负载电流 $i_L=7.42\text{A}$, 有功功率 P_L 为 1 310 W, 电



能质量分析仪对负载电流的各次谐波占有率进行分析, 其中电流总谐波畸变率 THD 高达 21.2%。从图 5 可以看出, 非线性负载(三相整流桥)向电网注入了大量的谐波电流, 给电网造成严重的污染。

下面将新型高压直流输电系统接入电网, 但只作为有源滤波器使用。测得电源电流 $i_s=7.71\text{A}$, 电源发出的有功功率 $P_s=1 370\text{W}$, 功率因数约为 1。图 6 为新型高压直流输电系统接入电网并作为有源滤波器后, 电网 a 相电流波形图。图 7 为新型高压直流输电系统提供的电流 i_c 的波形图。此时电网电流谐波总畸变率 THD 被减小到了 5.3%, 可见电网侧电能质量得到了明显改善。

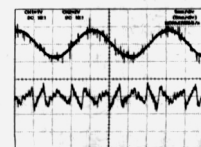
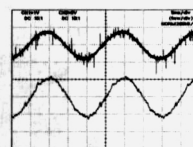


图6 电网电压和电网电流波形图 图7 电网电压和换流器电流波形图

最后, 进行和电网交换有功、无功功率的同时补偿负载谐波的实验。实测电网电压为 100.6 V, 换流器电流 $i_c=7.68\text{A}$, 有功功率 $P_c=1 100\text{W}$, (下转第 7 页)

表2 电场强度计算结果

序号	结构名称	方案1: K=0.45 屏端部倒角 R ₁₂	方案2: K=0.5 屏端部倒角 R ₁₂	方案3: K=0.5 屏端部倒角 R ₃₀	方案4: K=0.6 屏端部倒角 R ₃₀
1	高压屏蔽表面(空气侧)	0.49	0.49	0.49	0.49
2	套管外表面(空气侧)	1.35	1.59	1.38	1.83
3	套管内表面(SF ₆ 侧)	1.47	1.65	1.51	1.88
4	引线管外表面	5.93	4.39	4.39	3.86
5	支持绝缘子表面	3.15	2.31	2.30	1.97
6	分压屏蔽上部	9.16	6.46	4.38	3.58
7	分压屏蔽下部	6.37	6.22	5.51	7.04
8	地屏上部	11.69	8.90	7.93	8.32
9	接地屏蔽内表面	8.43	5.78	4.15	5.16
10	箱体连接法兰倒圆角处	8.74	7.49	6.33	7.57

注: 对于各关键部位详细图纸本文无法给出, 在此以“结构名称”的方式描述。

5 结语

(1) 提出带有分压屏蔽高压电器的绝缘设计要点和计算方法, 建立 SF₆ 标准电压互感器的有限元模型, 利用 Ansys 对其进行了绝缘优化设计。

(2) 对于 SF₆ 高压电器产品, 改善套管电位分布、降低电场强度的有效方法是设置分压屏蔽, 通过合理选择分压比 K、加大曲率半径或采用多曲率弧线等方法降低最大电场强度。

(3) 对类似结构的 1000 kV SF₆ 气体绝缘特高压电器, 可利用电容分压原理进行绝缘设计, 必要时可

设置两个或两个以上分压屏蔽, 但分压屏蔽数量的增加会给加工、装配等带来很大难度, 需要合理取舍。

参考文献:

- [1] 江 汛, 王仲奕. 复合高压套管的电场计算和分析 [J]. 高压电技术, 2004, 30(3): 17-18, 21.
- [2] 谈克雄, 薛家麒. 高压静电场数值计算 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.
- [3] 黎 斌. SF₆ 高压电器设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [4] 张国强, 张元录, 崔 翔. 高压套管均压球电极形状优化的研究 [J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(11): 37-40.
- [5] 吴南屏. 电工材料学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1993.

(上接第3页) 无功功率 $Q_c=950$ Var, 功率因数为 0.757, 电流总谐波畸变率 THD 为 10.4%。图 8 为换流器电流 i_c 的波形图。

此时, 实测电源电流 $i_s=5.8$ A, 有功功率 $P_s=-540$ W, 无功功率 $Q_s=-930$ Var, 电网电压为 106.5 V。图 9 为电网电流 i_s 的波形图, 此时电网电流谐波总畸变率 THD 被减小到了 3.8%。



图 8 电网电压和换流器电流波形图 图 9 电网电压和电网电流波形图

6 结语

首先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。在此基础上, 结合瞬时无功功率理论, 在新型高压直流输电系统传递功率的同时, 将它与新的有源滤波功能相结合, 并给出了其控制方法, 最后通过具体的试验样机证明了此方法的可行性和它的良好性能。

参考文献:

- [1] ASPLUND G, ERIKSSON K. DC Transmission Based on Voltage Source Converters [C]// CIGRE, 1998.
- [2] WEIMERS L. HVDC Light: A New Technology for a Better Environment [J]. IEEE Power Engineering Review, 1998, 18(8): 19-20.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] CLARO C A, KAFFKA J, CAMPOS A. Analysis and Design of a Shunt Active Power Filter Employing a Dead Beat Control Technique [C]// Industrial Electronics Society, IECON '99 Proceedings. The 25th Annual Conference of the IEEE, 1999: 1427-1433.
- [8] QIAO Chong-ming, JIN Tao-tao, SMEDLEY K M. One-cycle Control of Three-phase Active Power Filter with Vector Operation [J]. Industrial Electronics, 2004: 51(2): 455-463.
- [9] KIM Y S, KIM J S, KO S H. Three-phase Three-wire Series Active Power Filter, which Compensates for Harmonics and Reactive Power [J]. Electric Power Applications, 2004, 151(3): 276-282.