

基于双级矩阵变换器的线间潮流控制器

栗梅, 马进, 孙尧

(中南大学信息科学与工程学院, 长沙 410083)

摘要: 线间潮流控制器是柔性交流输电系统中的新装置, 通过控制有功和无功功率来增强电网传输能力。双级矩阵变换器是性能优良的交-交变频器。针对二者结构上的相似性, 提出将双级矩阵变换器作为线间潮流控制器, 以减小设备体积。首先对线间潮流控制器建模, 在 park 变换基础上, 使用比例积分控制设计 $d-q$ 轴控制方案, 采用交叉解耦消除电网间的耦合, 利用载波调制的空间矢量控制变换器开关动作, 取得了较好的控制效果。仿真验证了方案的可行性和正确性。

关键词: 双级矩阵变换器; 线间潮流控制器; 计算机仿真

中图分类号: TM76; TM46 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-8930(2008)06-0017-05

Interline Power Flow Controller Based on Two-stage Matrix Converter

SU Mei, MA Jin, SUN Yao

(School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The Interline Power Flow Controller (IPFC) is one of the newest devices within the FACTS (Flexible AC Transmission Systems) family. It can increase power grid transmission capacity by controlling real and reactive power flow. The two-stage matrix converter (TSMC) is a novel type of direct AC-AC power converter, and possesses many advantages over traditional counterparts. According to the similarities of the IPFC and TSMC, a new concept using two-stage matrix converter as the main converter of the interline power flow controller is proposed for capacitor-free advantage. A mathematical model of Interline Power Flow Controller has been presented based on park transformation. Then PI controllers have been used on the $d-q$ coordination in a decoupling control approach, to suppress the interference of the grid. The converter's switches are modulated in a carrier modulation approach for the space vector counterpart, and excellent results have been observed. Matlab/Simulink simulations demonstrated the validity of the conclusion.

Key words: two-stage matrix converter; Interline power flow controller; Computer simulation

线间潮流控制器 IPFC (interline power flow controller) 是灵活且功能强大的柔性交流输电 (FACTS) 装置, 可以同时多条输电线路上的有功潮流、无功潮流、相角等进行控制^[1]。传统的线间潮流控制器存在着固有的缺陷, 不能够针对系统中所有的电网进行有功和无功功率补偿, 必须牺牲其中一条电网为其他的电网提供所需要的有功功率。而且此种拓扑结构需要较大容量的中间直流储能电容, 为有功功率的补偿提供能量, 势必增加设备体积和安装成本, 且设备的使用寿命有限。双级矩

阵变换器 TSMC (two-stage matrix converter) 是一种直接变换型交-交电力变换装置, 具有能量双向流通、输入功率因数可控、正弦的输入输出电流、无需大的储能元件等优点^[2]。

本文针对传统线间潮流控制器的不足结合两种器件的拓扑结构上存在的共同点, 提出将双级矩阵变换器作为线间潮流控制器的核心控制器件, 组成基于双级矩阵变换器的线间潮流控制器。利用成熟的空间矢量调制策略 SVM (space vector modulation), 可以得到正弦输出电压和电流, 减少电网

收稿日期: 2007-12-18; 修回日期: 2008-01-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60674065); 湖南省自然科学基金项目 (05JJ30102); 湖南省科技攻关计划项目 (05GK3035)。

谐波,省去了传统潮流控制器中变换器之间较大容量的直流储能电容,起到了减小装置体积、增加设备使用寿命、节省成本的积极作用,具有广泛的发展空间。在理论分析的基础上结合空间矢量调制技术和交叉解耦技术设计控制器,最后基于 MATLAB/SMULNK进行仿真验证。

1 双级矩阵变换器的结构原理

1.1 双级矩阵变换器的拓扑结构

双级矩阵变换器的拓扑结构^[3](见图 1)同传统的交直交变换器相似:包含整流和逆变两级变换电路,不同的是其直流侧不需要滤波元件,整流级和逆变级采用双向开关。在保证直流电压极性为正的前提下,逆变级可采用单向开关。

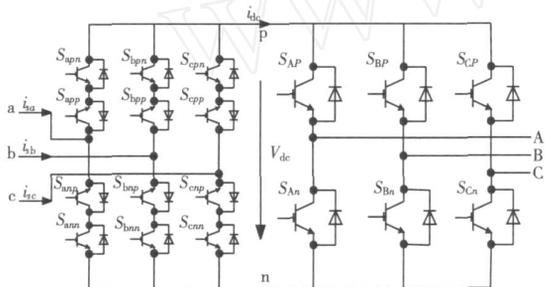


图 1 18开关双级矩阵变换器拓扑结构

Fig 1 Topology of two-stage MC voltage with 18 switches

1.2 双级矩阵变换器的变换关系

设矩阵变换器三相输入相电压为 V_i , 三相输出线电压为 V_o , 基于双空间矢量的双级矩阵变换器, 三相输入相电压到三相输出线电压变换关系为

$$V_o = T \cdot V_i \quad (1)$$

式中 T 为双级矩阵变换器的调制变换矩阵:

$$T = m \cdot \begin{bmatrix} \cos(\omega_o t - \theta_o + 30^\circ) \\ \cos(\omega_o t - \theta_o + 30^\circ - 2/3) \\ \cos(\omega_o t - \theta_o + 30^\circ - 2/3) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\omega_i t - \theta_i) \\ \cos(\omega_i t - \theta_i - 2/3) \\ \cos(\omega_i t - \theta_i - 2/3) \end{bmatrix}^T = T_2 \cdot T_1^T \quad (2)$$

式中: ω_i 为输入电压角频率; θ_i 为输入功率因数角; ω_o 为输出电压角频率; θ_o 为输出电压初相位角; m 为双级矩阵变换器的调制系数; T_1 为整流级开关函数, 其对应的变换关系为

$$V_{dc} = T_1^T \cdot V_i \quad (3)$$

其中, V_{dc} 为直流侧电压。当输入电压对称正弦时, 直流电压为一常量。 T_2 为逆变级开关函数, 其对应的变换关系为

$$V_o = T_2 \cdot V_{dc} \quad (4)$$

在输入输出平衡的条件下, T_1 、 T_2 为平衡正弦量, 双级矩阵变换器可得到对称正弦的三相输入电流和输出电压。

2 基于双级矩阵变换器的线间潮流控制器系统分析

图 2 为基于双级矩阵变换器的线间潮流控制器的整体电路结构, 由一个整流级和两个逆变级构成一拖多形式的双级矩阵变换器, 并连变压器 T_3 、串连变压器 T_1 、 T_2 以及控制和保护单元构成。其中双级矩阵变换器部分是该系统实现潮流控制的主要执行部分, 主要通过逆变级向各自的输电网中输入一幅值和相位可控的电压, 从而起到潮流调节的作用。而整流级部分主要是为逆变级提供所需的有功功率。

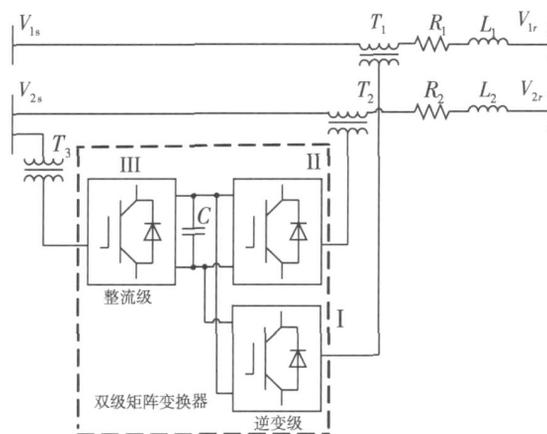


图 2 基于双级矩阵变换器的 IPFC 基本结构

Fig 2 Basic configuration of IPFC based on two-stage MC

由于双级矩阵变换器具有能量双向自由流动的优点, 由它构成线间潮流控制器的主要控制部分时, 整流级和逆变级之间的有功功率可以双向流动, 与此同时逆变级还可以独立的与电网交换(产生和吸收)无功功率。

在整个系统当中, 逆变级通过串联在电网中的变压器向所在电网中注入幅值和相位可调的电压 V_{pq1} 、 V_{pq2} 。注入的电压表现为一个基频交流同步电压源。电网电流流经这个电压源会导致

其与电网之间进行有功功率和无功功率的交换。这个无功功率可由逆变器自己产生,而在交流侧吸收的有功功率则转变为直流母线上或正或负的直流有功功率需求。

整流级 的基本功能就是提供或者吸收由逆变级 、 与电网发生功率交换所致的直流有功需求。这种直流有功功率需求由整流级 转变为交流形式并通过一个并联变压器耦合进电网。

图 3 是基于双级矩阵变换器的线间潮流控制器的等效电路图,为了简化分析,作如下假设:

两电网的发送端和接收端的电源相等,即 $V_{1s} = V_{1r} = V_{2s} = V_{2r} = V$, $\theta_1 = \theta_2 = \theta$ (其中 θ 为接收端与发送端电压的相位差);

两传输电路的参数相等,即 $L_1 = L_2 = L$, $R_1 = R_2 = R$ (实际电路当中两电网的参数一般都是不相同的)。

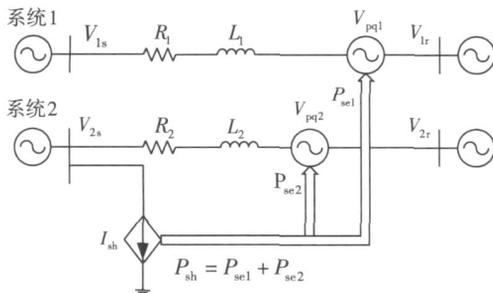


图 3 基于双级矩阵变换器的线间潮流控制器的等效电路

Fig 3 Equivalent circuit of IPFC based on two-stage MC

在 $d - q$ 旋转坐标系下对基于双级矩阵变换器的线间潮流控制器模型进行分析研究,该旋转坐标系适用于稳态分析,对映射到直轴和交轴上的变换器输出值进行灵活多变的控制^[4],所研究系统中的串并联变换器认为是基频理想正弦波形^[5]。在稳态下整流级 和逆变级 、 之间的有功功率相等,可以用下面这个公式表示:

$$P_{sh} = \sum_{i=1}^m P_{se-i} \quad (5)$$

在公式 (5) 中, m 代表逆变级的个数,本文为了简化只考虑了最简单的情况,即 $m = 2$,可得出:

$$P_{sh} = V_{2sd} I_{shd} + V_{2sq} I_{shq} \quad (6)$$

$$P_{se1} = V_{pq1d} I_{1rd} + V_{pq1q} I_{1rq} \quad (7)$$

$$P_{se2} = V_{pq2d} I_{2rd} + V_{pq2q} I_{2rq} \quad (8)$$

其中: I_{1r} , I_{2r} 分别为两条电网接收端的电流,下标

d, q 分别代表上述各分量在 $d - q$ 坐标系 d 轴和 q 轴上的分量。

3 潮流控制器设计

从图 3 的等效电路模型可以得出线间潮流控制器的串联部分的电路方程为:

$$\frac{di_{xs}}{dt} = -\frac{R}{L} i_{xs} + \frac{1}{L} (v_{xs} - v_{pqx} - v_{xr}) \quad (9)$$

其中 x 代表两条电网中的任意一条,假设串联变压器是理想的变压器。利用 park 变换可以将方程 (9) 变换到同步旋转的 $d - q$ 坐标系下。以系统 1 为例利用变换矩阵 T 把方程 (9) 变换到 $d - q$ 坐标系下,可以得出:

$$\frac{di_{sd}}{dt} = -i_{sq} - \frac{R}{L} i_{sd} + \frac{1}{L} (v_{1sd} - v_{pq1d} - v_{1rd}) \quad (10)$$

$$\frac{di_{sq}}{dt} = i_{sd} - \frac{R}{L} i_{sq} + \frac{1}{L} (v_{1sq} - v_{pq1q} - v_{1rq}) \quad (11)$$

变换矩阵 T 为

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

其中 ω 为旋转角频率 (12)

同理系统 2 中的串联部分也可以得到类似的结果。从 Akagi 的瞬时功率理论^[6],可以得出下面的有功和无功功率瞬时表达式:

$$P = \frac{3}{2} (v_{1rd} i_{1rd} + v_{1rq} i_{1rq}) \quad (13)$$

$$Q = \frac{3}{2} (v_{1rd} i_{1rq} - v_{1rq} i_{1rd}) \quad (14)$$

本文所研究的传输系统当中,期望的有功功率和无功功率通常作为控制器的输入,因此通过期望的有功和无功功率 P_{ref} 、 Q_{ref} 以及测量到的线路接收端的电压 v_{1r} ,就可以通过公式 (13) 和 (14) 计算出输入电流的参考值 i_{1rdref} , i_{1rqref} 。

$$i_{1rdref} = \frac{2}{3} \frac{(P_{ref} v_{1rd} - Q_{ref} v_{1rq})}{v_{1rd}^2 + v_{1rq}^2} \quad (15)$$

$$i_{1rqref} = \frac{2}{3} \frac{(P_{ref} v_{1rq} + Q_{ref} v_{1rd})}{v_{1rd}^2 + v_{1rq}^2} \quad (16)$$

此时电网中的电流 i_{1rd} 、 i_{1rq} 始终保持与参考值一致,所以电网接收端的有功功率和无功功率就保持与参考输入 P_{ref} 、 Q_{ref} 一致^[7]。利用公式 (15)

(16)计算出的参考电流 i_{1rdref} 、 i_{1rqref} 与电网接收端检测的电流 i_{1rd} 、 i_{1rq} 相比较,其差值通过比例积分(PD)控制器进行校正就得到串联变换器的控制量

$$V_{pq1d}、V_{pq1q}$$

4 双级矩阵变换器输出电压控制

双级矩阵变换器输出端电压就是线间潮流控制器串联变压器的原边电压,将变压器理想化,可得到变换器输出端电压电流和电网串联补偿电压及电流的关系式如下:

$$V_o = \frac{V_{pq}}{n} \tag{17}$$

$$I_o = nI_{xr} \tag{18}$$

式中: n 为串联变压器的变比; V_o 、 I_o 分别为双级矩阵变换器的输出端电压和电流; V_{pq} 为串联补偿电压; I_{xr} 代表电网接收端的电流。

由上式可知,改变 V_{pq} 以实现潮流控制,实际上是通过改变双级矩阵变换器输出电压矢量 V_o 来实现的。

基于对双级变换器的分析可知,变换器输出电压受到调制变换矩阵 T 的控制,只需要控制整流级开关函数 T_1 和逆变级开关函数 T_2 就可以得到期望输出电压,进而控制电网潮流。按照此思路,将双级矩阵变换器纳入控制过程,就得到基于双级矩阵变换器的潮流控制器控制框图,如图 4所示。

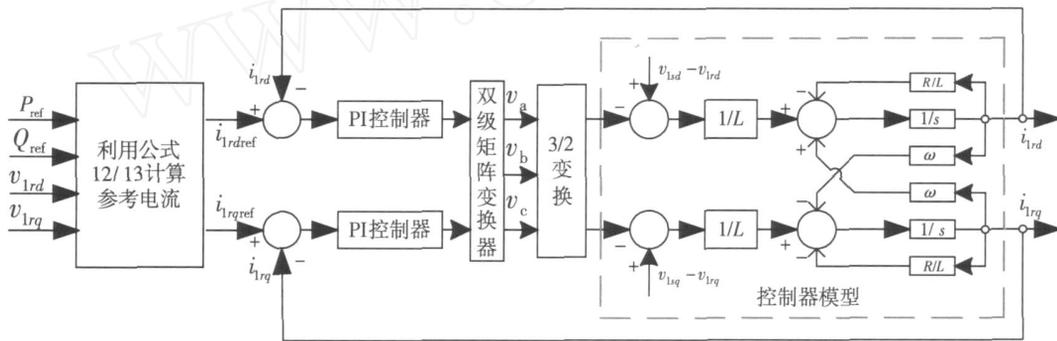


图 4 基于双级矩阵变换器的 IPFC 串联控制器控制框图

Fig 4 Block diagram of the IPFC series converter based on two-stage MC

对于并联的变换器,由图 3可以得出它的数学模型,用下面的方程表示:

$$\frac{di_{px}}{dt} = -\frac{r_p}{L_p} i_{px} + \frac{1}{L_p} (v_{px} - v_{pqx} - v_{xr}) \tag{19}$$

其中: i_{px} 为并联的三相电流; v_{px} 为整流级产生的三相电压。 r_p 、 L_p 分别代表并联回路的电阻和电感(包括并联变压器产生的漏感),用 park变换可以将式(19)变换为 $d-q$ 坐标系下的方程。

$$\frac{di_{pd}}{dt} = i_{pq} - \frac{r_p}{L_p} i_{pd} + \frac{1}{L_p} (v_{pd} - v_{pq2d} - v_{2rd}) \tag{20}$$

$$\frac{di_{pq}}{dt} = -i_{pd} - \frac{r_p}{L_p} i_{pq} + \frac{1}{L_p} (v_{pq} - v_{pq2q} - v_{2rq}) \tag{21}$$

并联部分的控制系统框图与串联部分控制框图类似,不再赘述。本文研究的对象在有功率没有损耗的全部传送到接收端的假设条件下进行的,但实际电网在传输当中不可避免的存在着各种损耗,而且控制器自身也存在着损耗。这些损耗必须由发送端来提供,因此在发送端有功功率的参考值中包含着系统损耗值。

5 仿真实验

根据上述分析,利用 Matlab/Simulink对所设计系统进行仿真,系统的参数如下:电网的发送端和接收端电压相同为 500V。电网的线路阻感参数:电阻为 0.8、电感为 10mH。整流级电路阻感参数为:电阻为 0.4、电感(包括并联变压器漏感)为 10mH。

根据图 2搭建仿真模型,电网发送端电压和接收端电压的相位差 $= 20^\circ$ 幅值相等。为了便于分析,假设两电网的参数一致。两条电网有功功率初始值设置为 1000W,在 0.1s时改变 System 2 的有功功率为 2000W,在 0.2s改变 System 1 的有功功率为 500W,0.25s时改变 System 2 的有功功率为 2500W,0.3s时改变 System 1 的有功功率为 1000W。对应的仿真结果如图 5所示。

从波形图可以看出,通过所设计的控制系统,动态响应的过渡过程短暂(0.05s)。而且对两电

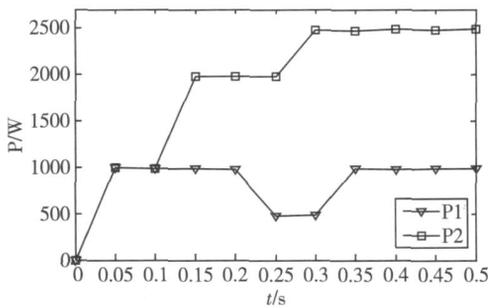


图 5 基于双级矩阵变换器的 IPFC潮流控制
Fig 5 Power flow control of IPFC based on two-stage MC

网的有功功率补偿相对独立互不干扰。相应的电流和电压波形如图 6 所示。

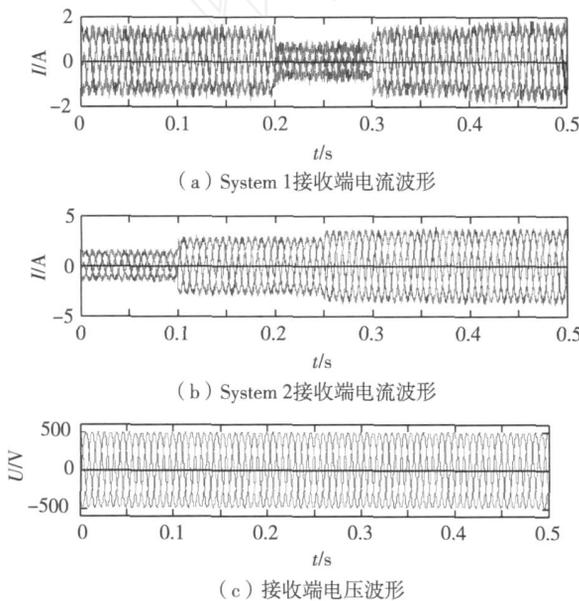


图 6 IPFC仿真电流电压波形
Fig 6 Simulation waveform of IPFC

6 结语

针对传统线间潮流控制器的不足,本文提出了利用双级矩阵变换器作为潮流控制器的核心控制部分,利用矩阵变换器能量可以双向流动、输入输出为正弦量以及省去了中间较大容量的储能环节,缩小了设备体积,增强了可靠性以及节省了成本。

采用该方法保证了补偿快速性的同时,也解除了电网之间的耦合,省去了专门针对中间直流电容的控制器设计,简化了控制策略。仿真结果验证了理论分析的正确性。

参考文献:

- [1] Gyugyi L, Sen K K, Schauder C D. The interline power flow controller concept: a new approach to power flow management in transmission systems [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1999, 14 (3): 1115 - 1123.
- [2] Casadei D, Serra G, Tani A. Reduction of the input current harmonic content in matrix converter under input/output unbalance [J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 1998, 45 (3): 401 - 410.
- [3] Wei L X, Lipo T A, Chan H. Matrix converter topologies with reduced number of switches [C] // 2002 IEEE 33rd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, Cairns, Qld, Australia: 2002.
- [4] Amez R L V, Zanetta L C. Unified power flow controller (UPFC): its versatility in handling power flow and interaction with the network [C] // IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exhibition, Yokohama, Japan: 2002.
- [5] Akagi H, Kanazawa Y, Nabae A. Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage component [J]. IEEE Trans on Industrial Applications, 1984, 20 (3): 625 - 630.
- [6] 李岩松, 郭家骥, 刘君 (Li Yansong, Guo Jiaji, Liu Jun). 应用 UPFC 控制电力网络潮流的研究 (The study on controlling power flow of network applying UPFC) [J]. 电力系统及其自动化学报 (Proceedings of the CSU - EPSA), 2000, 12 (4): 4 - 8.

作者简介:

粟 梅 (1967—), 女, 教授, 博士生导师, 从事电力系统自动化、电力电子及电力传动方面的研究。Email: sumeicsu@yahoo.com.cn

马 进 (1982—), 男, 硕士研究生, 从事电力系统及其自动化技术方面的研究。Email: mjinu@ yahoo.com.cn

孙 尧 (1981—), 男, 博士研究生, 从事非线性控制在电力电子方面的应用研究。Email: yaosuncsu@gmail.com