

交直流电力系统潮流计算综述

直流输电是未来电网的发展方向，具有广阔的应用前景。随着直流工程大范围内的投入运行，对交流电网产生了较大的影响，传统的潮流计算方法已经不再适用于交直流潮流计算。对比分析了现有的传统直流与柔性直流的稳态建模方法及适用于潮流计算的数学模型，并针对直流系统潮流方程组的独立性与非线性问题进行了讨论。同时，归纳了现有的交直流潮流计算的算法，并对这些算法的收敛性与计算效率进行了简要分析。

高 凯¹ 刘博文² 何晓洋¹ 王振浩² 韩子娇¹ / 1. 辽宁省电力有限公司
2. 东北电力大学电气工程学院



高 凯/高级工程师

关键词/Keywords

潮流计算 ·
交直流系统 ·
高压直流输电 ·
电压源型换流器 ·

高压直流输电技术起始于20世纪20年代，在20世纪90年代末期得到了飞速发展^[1]。基于相控换流器技术的传统高压直流输电（HVDC）作为一项日益成熟的输电技术已经广泛应用于远距离大容量输电、电网互联和海底电缆输电等方面^[2]。近些年，伴随着电力电子元件生产工艺不断提高和脉宽调制（PWM）技术的不断完善，使得以电压源型换流器（VSC）为基础的柔性直流输电技术得到了快速发展^[3]。相较传统高压直流输电技术而言，柔性直流输电技术不仅克服了其一些固有缺陷，而且极大地提高了输电电压等级和输电容量，同时也使得电能质量得到了改善^[3-4]。

在我国，伴随着大量高压直流输电工程不断投入运行^[5-6]，对电力系统原有设备^[7]、系统运行方式、继电保护整定和系统稳定性^[8]等方面产生了巨大的影响。上述问题已经引起了大量学者的注意，

但分析这些问题时需以交直流混联系统的潮流计算为基础。为此，本文从直流系统的稳态建模入手，分别总结了传统直流和柔性直流系统的换流器功率特性和稳态模型。而后，基于不同的调控策略建立了二者的潮流计算模型，同时指出二者直流功率平衡方程中控制变量的相同与不同之处。此外，还对功率方程间的独立性问题进行讨论。最后，归纳了现有的交直流系统潮流计算方法及计算中出现的潮流不收敛、求解效率及控制策略转换等问题。

交直流系统潮流计算的数学描述

交流系统潮流计算的目的是求解表征各节点运行状态的量，每个交流节点都有四个运行状态参数： P 、 Q 、 V 和 θ 。由于交直流系统既包括交流系统也包括直流系统，故在其潮流计算中不仅要求解出交流系统的运行状态，也需要求解直流系统的运行状态。在数学角度上潮流计算的求解就是对一组含有上述状态量的多元非线性方程组进行求解，数学描述如下

$$\begin{cases} F(X_{AC}, X_{DC}) = 0 \\ G(X_{AC}, X_{DC}) = 0 \end{cases}$$

式中， X_{AC} 、 X_{DC} 分别为交流系统的状态变量和直流系统的状态与控制变量； $F(X_{AC}, X_{DC})$ 为系统中交直流节点的功率平衡方程组，此处对于交直流系统相连的节点应进行修正，考虑直流系统向其中注入的功率不平衡量，对于多馈入直流系统也需要考虑换流器间的功率平衡等问题； $G(X_{AC}, X_{DC})$ 为潮流计算附加方

2014国网公司科技项目《柔性环网控制器关键技术研究及示范应用》（2014GW-05）。

程组,包括交流系统节点约束条件和直流系统控制约束方程及控制变量附加方程等。

对于多元非线性方程组的求解,主要考虑采用迭代的方式。目前,对于交直流系统的潮流求解主要有两种方式:统一迭代法和交替迭代法,也有学者采用优化思想求解潮流^[9],并在大规模交直流混联系统中取得了良好的效果。关于交直流混联系统潮流计算的算法问题将在下文进行详细讨论。

交直流系统潮流计算的数学建模

对交直流潮流计算的研究,首要是建立稳态下的直流换流器模型。当得出换流器的稳态模型后,应计及换流器的调制策略与控制方式给出直流系统的潮流附加方程,使直流系统潮流计算可解。

1. 传统直流系统

(1) 传统直流系统稳态建模

目前,传统直流在交直流潮流计算中一般采用准稳态模型进行等效处理^[10-13]。换流器采用准稳态模型等效之后的交直流系统如图1所示。

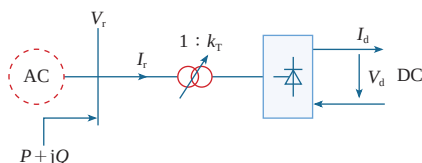


图1 传统直流输电换流站示意图

文献[11]对换流器的准稳态等效模型进行了仿真验证,结果证明准稳态模型不仅反映出了稳态条件下换流器的功率特性,而且其准确度完全满足实际工程的需要。文献[14]也基于稳态模型采用了交替迭代法进行交直流系统的潮流计算,并且在换流器采用多种控制方式下,均得到了符合实际的潮流计算结果,直流部分的潮流计算具有良好的收敛性。传统高压直流系统换流器的稳态模型与经典理论推导出的换流器模型不同。经典换流器模型中换相电压为换流器交流母线看出去的系统等效电动势,相应的换流器所有控制角都是据此等效电动势来定义;换相电抗由交流系统等效电抗和换流变压器的漏抗两者组成。因此

对于一个多桥换流器而言,各个桥的运行是相互影响的。在交流系统较强时准稳态模型可以很好地满足潮流计算的需要,但当交流系统相对较弱时应采用换流器的动态模型,比如换流器经典模型。文献[15]采用动态相量法得到了介于稳态模型和详细电磁暂态模型之间的一种相量模型。该模型不仅能够良好地反映出换流器的功率特性,而且能够极大地提高计算的准确性,在交直流混联系统的潮流计算中有良好的应用价值。

(2) 传统直流系统控制方式及潮流方程

交直流混联系统在传统交流系统中又引入了五个状态变和两个控制变量。五个状态变量:注入换流器的有功功率 P 和无功功率 Q ;直流母线电压 V_d 及直流电流 I_d ;换流器的功率因数角 φ 。两个控制变量:变压器电压比 k_T 、换流器控制角 θ 。在求解上述交直流系统潮流时还应该考虑对直流系统的运行方式加以指定,使得直流系统潮流方程可解。在传统高压直流系统中常采用的控制方式通常为:调整整流器的控制角使其直流电流为定值,即定直流电流控制方式;调整逆变器的控制角,使其熄弧角为定值,即定熄弧角控制方式。

文献[16]提出了当换流阀采用低电压限电流和最小触发角限制控制方式时其控制方程的建立。同时,详细地给出了不同控制条件下直流系统潮流迭代方程的数学描述及交流系统潮流方程的修正。文献[17]在常规的交直流混联系统潮流计算基础上,进一步对计算中控制方式调整的问题进行考虑,使得计算结果能够反映系统实际的控制方式及其转换过程。并且,文章详细地分析了定功率控制的特点及换流器运行方式转换策略,同时还提出了如何通过计算机控制多端直流输电系统的运行方式转换。

综上,与交流潮流计算方程相比较,基于传统高压直流输电的交直流潮流计算不仅仅需要计算交流系统各个节点的电压和相角等状态量,还需要计算直流系统中的各个换流器直流电压、直流电流、控制角、换流变压器电压比和换流器的功率因数角。因此,选择恰当的直流系统稳态模型,考虑换流器的控制方式,是建立交直流混联

系统潮流计算数学模型的关键。

2. 柔性直流系统

(1) 柔性直流系统稳态建模

传统高压直流输电系统的控制方式较为简单,只需要调节控制角及换流变压器即可实现功率的输送。随着直流技术的发展,柔性直流技术因其对传输功率灵活的控制特性,逐渐引起了学者的广泛研究;但由于柔性直流输电系统中存在大量全控型电力电子元件,使得系统呈现出高度的离散化与非线性化特点,给建立适用于潮流计算的数学模型带来了困难,如图2所示。现有的VSC稳态模型都是从换流器外部功率特性角度进行分析而得出的^[18-19]。

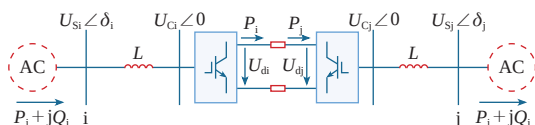


图2 基于VSC-HVDC的交直流混联系统

对于受控电压源型换流器的稳态建模不仅仅要考虑其稳态下的外部功率特性,还要考虑其采用的调制策略与控制策略。目前,较为成熟的柔性直流系统调制策略为脉宽调制。

文献[20-21]均采用不同的方法对受控电压源型换流器进行了建模。文献[20]在 $dq0$ 坐标系下建立了基于受控电压源型换流器稳态模型,并设计了基于 $dq0$ 坐标系下的有功功率和无功功率控制器。但是该文献并没有从潮流计算的角度给出潮流方程的数学描述。文献[21]采用等效电路的思想对基于受控电压源型换流器进行了建模。在三相对称条件下把换流器等效成为受控电压源与可变阻抗串联的形式,大大地简化了采用统一迭代法时潮流计算的复杂性,但每次迭代后需要重新计算导纳矩阵和Jacobian矩阵,也给潮流方程的迭代求解带来了新的困难。

(2) 柔性直流系统潮流方程及控制方式

柔性直流系统换流器的有功功率类控制量:交流侧注入的有功功率 P ;直流母线电压 U_d 。无功功率类控制量:交流母线电压 U_s ;交流侧注入无功功率 Q 。其中,有功类控制量主要和PWM相角 δ

相关,无功类控制量主要和调制度 M 相关。

在柔性直流系统运行的实际控制中,控制方式主要如下。

1) 按指定控制参数运行,即给定换流器的调制度 M 和PWM相位角 δ 。

2) PWM相位角 δ 为给定值,交流侧注入无功功率或交流电压为给定值。

3) 调制度 M 为给定值,直流侧电压或直流功率为给定值。

4) 换流器按指定控制目标运行,即在有功类控制量 and 无功类控制量中各选择一个。

需要注意:为了保证有功功率的平衡性,在选择有功类控制量时一定要有一端换流器采用定直流母线电压控制方式。并且,对于同一个换流站不能在有功类控制量或无功类控制量中同时选择两个。

对于基于柔性直流的交直流潮流计算,文献[18,22]都从换流器的外部功率交换机理入手研究其并网后的功率特性,并在建立了稳态模型后计及不同的调制策略及控制方式得出潮流计算模型。通过算例的验证,这种潮流计算模型不仅能够正确地反映交直流混联系统中直流量与交流量间的关系,而且符合直流系统实际控制运行方式,满足了工程应用的要求。文献[23]基于以上潮流计算模型,并扩展到多端直流系统的交直流潮流计算中。通过建立直流节点导纳矩阵,得出直流网络方程,采用迭代的方式求解直流网络中的潮流分布。但以上文献均在状态变量中加入了直流电流 I_d 。最然,换流站在实际的运行中有时的确采用定直流电流控制方式,但定直流电流控制方式的实质是定有功功率控制,最终也是反映到对PWM相角 δ 的控制。在状态变量中引入直流电流 I_d ,不仅使求解的变量数目增加,也使得参加迭代的方程组数目增加,因而影响潮流计算求解速度。参考交流系统的潮流计算,当网络的参数确定后,视在功率与电压电流相量形成六个方程,但这六个方程所组成的非线性方程组是非独立的,往往只使用视在功率与电压相量所建立的方程组来迭代求解交流系统潮流分布。故而,在交

直流潮流计算中引入直流电流 I_d 的合理性是值得探讨的。文献[24]将换流站与直流线路的损耗大小等效为直流电流的二次函数加入潮流计算中,提高了潮流计算的准确度。文献[25]提出了一种基于多端柔性直流系统的交直流潮流计算模型。并且,提出把换流器节点与滤波器节点等效为相应的交流节点和考虑不同控制方式及有无滤波器时潮流计算方程的变形。最后,通过MATPOWER工具箱验证了潮流计算模型的有效性。文献[26]提出把换流站等效为电压源并联接入交流系统节点中,并且给出了潮流计算模型。同时,根据换流站不同的工作方式给出了相应的潮流计算结果。但是,此模型只简单地考虑了直流系统的外部功率特性,没有考虑直流系统控制方式对交流系统的影响,因此只适用于直流接入强交流系统时的潮流计算。

3. 交直流系统的潮流计算模型

建立潮流计算模型是交直流混联系统潮流计算的首要问题,也是关键问题之一。潮流计算模型的准确性直接影响潮流计算的结果及其求解速度。具有使用价值的潮流计算模型不仅要准确地反映系统中交直流状态变量与控制变量间的关系,也要满足系统的控制方式和运行状态。

本文提及的对于传统高压直流系统和柔性直流系统的潮流计算建模,首先从两者换流器的外部功率特性入手,建立了直流系统与交流系统间的功率交换方程;而后利用两者间的调控策略,建立了换流站交流状态量、直流状态量与直流控制量间的关系;最后通过换流器不同的控制方式引入不同的附加控制方程,使变量个数等于方程个数,从而使得系统潮流可解。

交直流混联系统的潮流计算模型,是由其稳态模型方程及控制附加方程构成的非线性方程组。在构成潮流计算模型方程组时,应该尽量保证其独立性。在求解潮流计算模型的方程组时应该降低其非线性。线性方程组系数矩阵的秩等于其增广矩阵的秩时,认为各方程间相互独立且方程组可解。可是这种方法显然对于非线性方程组不适用。但从功率、电压、电流及阻抗的角度来

分析,以上四个物理量中只要其中两个物理量已知便可以表示其余的物理量。因此,可以利用电力系统的这种特性,间接地来判断潮流计算方程组是否满足独立性要求。在求解潮流计算模型的方程组时可以把某些对角度的求解转化为对其正弦值或余弦值的求解,这样达到使方程组的非线性降低的目的。

交直流系统潮流计算的求解方法

交直流混联系统的潮流计算模型在描述交流系统的非线性方程组中引入了直流系统的状态变量与控制变量,因而相应地也增加了描述直流系统的方程,如图3所示。这样传统的交流系统潮流计算方法在此已经不适用。但是在原有的交流系统潮流算法中进行适当的改进与补充则能够很好地应用于交直流潮流计算中。交直流潮流计算的方主要有两类:统一迭代法和交替迭代法。

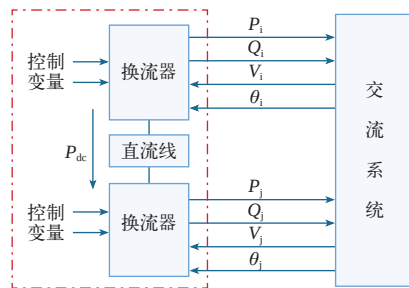


图3 交直流系统潮流计算模型

1. 统一迭代法

统一迭代法是以极坐标下的牛顿法为基础,将交流节点的状态变量与直流系统的状态变量和控制变量统一进行迭代求解,其也被称为联合求解法^[10]。

这种方法具有良好的收敛性,对于不同的网络结构和不同的直流系统控制方式的算例,都能可靠地求得收敛解。但是基于牛顿法的统一迭代法计算时增加了Jacobian矩阵的阶数,并且每次迭代后需要重新计算Jacobian矩阵,这样使得计算量增大。文献[27]对传统的牛顿法进行了改进,采用简化的牛顿法数学模型,在潮流计算中只需要计算一次Jacobian矩阵。并且,提出了根据网络大小及收敛准确度要求,混合使用简化牛顿法、三阶

收敛牛顿法及六阶收敛牛顿法来提高求解速度。文献[28]通过使用计及控制方式的直流系统稳态模型,使得交直流潮流计算时不用因控制方式改变而更改Jacobian矩阵。但这种处理方式在潮流方程组中引入了冗余方程组,导致Jacobian矩阵中出现了冗余系数,处理不得当时易使收敛性降低,并且在具有多条直流线路的交直流系统中Jacobian矩阵阶数更高,收敛性及求解速度难以保证。针对牛顿法的不足,文献[29]提出利用改进的布罗伊登法来进行交直流潮流计算也取得了较好的效果。

2. 交替迭代法

交替迭代法是统一迭代法的一种简化形式。交替迭代法在迭代计算过程中,将交流系统方程和直流系统方程分别进行求解。在求解交流系统方程时,把直流系统当做接在交流节点上的有功功率和无功功率已知的负荷。在求解直流系统方程时,把交流系统模拟成一个加在换流器交流母线上的恒压源。

交替迭代法计算速度快,直流部分及交流部分可以使用不同的算法,但是其对交直流系统初值给定要求高,收敛性较差,易造成潮流求解的振荡和不收敛。文献[30]结合快速解耦法,通过研究直流系统与交流系统间的耦合关系,准确得出直流系统控制变量对交流系统潮流方程组的影响,并研究了不同控制方式下的修正矩阵对交直流潮流计算收敛性的影响。该算法明显地改善了交直流潮流计算的收敛性,并且提高了计算速度。文献[16]很好地解决了某些控制方式下直流系统系数矩阵不可逆的情况,该作者还在文献[31]中从交直流系统潮流在线计算的鲁棒性分析与快速性问题入手,提出了直流系统采用牛顿法求解,解决了潮流计算中由于交流母线电压波动导致直流系统潮流求解不收敛的情况。

结束语

本文从直流系统稳态模型的角度出发,总结了交直流混联系统潮流计算模型的建立方法;对比分析了传统直流与柔性直流的潮流计算模型中控制方式与控制变量的不同之处;讨论了潮流计

算模型方程的独立性问题及求解时降低其非线性问题。同时,归纳了现有的交直流混联系统潮流计算方法,并从算法的收敛性和求解的快速性等方面给出了适当的分析。

参考文献

- [1] 汤广福. 基于电压源换流器的高压直流输电技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [2] 杨卫东, 徐政, 韩祯祥. 混合交直流电力系统的非线性调制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2002 (7): 1-6.
- [3] 徐政. 柔性直流输电系统 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- [4] Flourentzou N, Agelidis V G, Demetriades G D. VSC-Based HVDC power transmission systems: an overview [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24 (3-4): 592-602.
- [5] 舒印彪. 中国直流输电的现状与展望 [J]. 高电压技术, 2004 (11): 1-2, 20.
- [6] 袁清云. 特高压直流输电技术现状及在我国的应用前景 [J]. 电网技术, 2005 (14): 1-3.
- [7] 蒯狄正, 万达, 邹云. 直流输电地中电流对电网设备影响的分析与处理 [J]. 电力系统自动化, 2005 (2): 81-82.
- [8] 李兴源, 赵睿, 刘天琪, 等. 传统高压直流输电系统稳定性分析和控制综述 [J]. 电工技术学报, 2013 (10): 288-300.
- [9] 覃智君, 侯云鹤, 吴复立. 大规模交直流系统潮流计算的实用化模型 [J]. 中国电机工程学报, 2011 (10): 95-101.
- [10] 王锡凡, 万良, 正春. 现代电力系统分析 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [11] 周长春, 徐政. 直流输电准稳态模型有效性的仿真验证 [J]. 中国电机工程学报, 2003 (12): 36-39.
- [12] Braunagel D, Kraft L, Whysong J. Inclusion of DC converter and transmission equations directly in a Newton power flow [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1976, 95 (1): 76-88.

- [13] Smed T, Andersson G, Sheble G, et al. A new approach to AC/DC power flow [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1991, 6 (3) : 1238-1244.
- [14] 汪馥英. 交直流电力系统的潮流计算 [J]. 华中理工大学学报, 1993 (1) : 122-124.
- [15] 王钢, 李志铿, 李海峰, 等. 交直流系统的换流器动态相量模型 [J]. 中国电机工程学报, 2010 (1) : 59-64.
- [16] 刘崇茹, 张伯明, 孙宏斌, 等. 多种控制方式下交直流系统潮流算法改进 [J]. 电力系统自动化, 2005 (21) : 29-35.
- [17] 刘崇茹, 张伯明. 交直流输电系统潮流计算中换流器运行方式的转换策略 [J]. 电网技术, 2007 (9) : 17-21.
- [18] 郑超, 周孝信, 李若梅, 等. VSC-HVDC稳态特性与潮流算法的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2005 (6) : 4-8.
- [19] 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 (1) : 18-23.
- [20] 陈谦, 唐国庆, 胡铭. 采用dq0坐标的VSC-HVDC稳态模型与控制器设计 [J]. 电力系统自动化, 2004 (16) : 61-66.
- [21] 钟庆, 马新华, 王钢, 等. 电压源型换流器稳态等值电路模型 [J]. 高电压技术, 2014 (8) : 2485-2489.
- [22] 郑超, 盛灿辉. 含VSC-HVDC的交直流混合系统潮流统一迭代求解算法 [J]. 中国电力, 2007 (7) : 65-69.
- [23] 陈谦, 唐国庆, 王浔. 多端VSC-HVDC系统交直流潮流计算 [J]. 电力自动化设备, 2005 (6) : 1-6.
- [24] Beerten J, Cole S, Belmans R. A sequential AC/DC power flow algorithm for networks containing multi-terminal VSC HVDC systems [C]. Proceeding of IEEE Power and Energy Society General Meeting, Minnesota, 2010, 2010 : 7.
- [25] Beerten J, Cole S, Belmans R. Generalized steady-state VSC MTDC model for sequential AC/DC power flow algorithms [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27 (2) : 821-829.
- [26] Angeles-Camacho C, Tortelli O L, Acha E, et al. Inclusion of a high voltage DC-voltage source converter model in a Newton-Raphson power flow algorithm [J]. IEEE Proceedings-Generation Transmission and Distribution, 2003, 150 (6) : 691-696.
- [27] 黄曙, 何桦, 卫志农, 等. 基于改进牛顿法的VSC-HVDC潮流计算 [J]. 江苏电机工程, 2013 (1) : 18-22.
- [28] 邱革非, 束洪春, 于继来. 一种交直流电力系统潮流计算实用新算法 [J]. 中国电机工程学报, 2008 (13) : 53-57.
- [29] 曾超, 彭建春, 金灵满, 等. 基于改进布罗伊登法的交直流潮流计算 [J]. 继电器, 2008 (11) : 5-8, 36.
- [30] 王宪荣, 柳焯, 张伯明. 一种交直流潮流PQ解耦算法 [J]. 电力系统自动化, 1992 (1) : 40-47.
- [31] 刘崇茹, 张伯明. 交直流混合系统潮流算法改进及其鲁棒性分析 [J]. 中国电机工程学报, 2009 (19) : 57-62.

(收稿日期: 2015-02-10) EA

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告