

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.180638

# 一种新型 VSC 潮流计算模型

陈宇杰, 王 淳, 丁梦妮, 伍惠铨, 刘 宽

(南昌大学电气与自动化系, 江西 南昌 330031)

**摘要:** 交替迭代法由于处理换流器控制策略的灵活性以及对单侧潮流计算方法的良好继承性而被广泛采纳, 但该方法用于求解基于目前广泛采用的电压源换流器(Voltage Source Converter, VSC)潮流计算模型的混合系统潮流时, 会出现交直流系统间的多次交替迭代问题。从避免多次交替迭代问题和进一步减少计算量的角度出发, 对 VSC 潮流计算模型进行重塑, 提出一种新型 VSC 潮流计算模型。该模型将 VSC 的有功损耗等效至直流侧, 并重新对交直流系统设定边界, 在避免了交直流系统间多次交替迭代问题的同时也相应减少了混合系统的潮流计算量。最后在 IEEE9 节点系统增加直流环节形成一个交直流混合系统, 对所提模型进行测试, 测试结果表明了所提模型的有效性和高效性。

**关键词:** 交替迭代法; 电压源换流器; 混合系统潮流计算; 多次交替迭代; 边界

## A new VSC power flow calculation model

CHEN Yujie, WANG Chun, DING Mengni, WU Huicheng, LIU Kuan

(Department of Electrical and Automatic Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

**Abstract:** The alternative iteration method is widely used because of the flexibility of the converter control strategy and the good inheritance of the single-side power flow calculation method. However, there will be multiple alternating iterations between AC and DC systems while the alternative iteration method is used to solve the power flow of the hybrid system based on the existing widely used Voltage Source Converter (VSC) model. To avoid multiple iterative problems and further reduce the computational burden, a new VSC power flow calculation model is reconstructed and proposed. In this model, the active loss of VSC is equivalent to the DC side and the boundary of the AC / DC system is redefined, which can both avoid the multiple alternating iterations problem of the AC / DC system and reduce the power flow computational burden of the hybrid system. Finally, an AC / DC hybrid system is formed by adding DC link in the IEEE9 node system, and is used to test the proposed model. The result validates the effectiveness and efficiency of the proposed model.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51467012).

**Key words:** alternative iteration method; voltage source converter; hybrid system power flow calculation; multiple alternating iterations; boundary

## 0 引言

直流技术<sup>[1-2]</sup>在系统多方式运行切换、地下城市输电<sup>[3]</sup>、海底电缆输电<sup>[4]</sup>、分布式电源并网<sup>[5-7]</sup>等方面具有突出的优势, 同时其在电压变换方面的劣势也由于电力电子技术的不断发展和日臻完善得到了明显改善, 尤其是电压源换流器(Voltage Source Converter, VSC)<sup>[8-9]</sup>的出现, 因此基于 VSC 的直流电

网将是未来电网<sup>[10-12]</sup>的一个发展趋势, 包含 VSC 的交直流混合系统潮流计算将成为一项重要的研究内容, 能否建立一个高效的 VSC 潮流计算模型将是解决混合系统潮流计算的关键。

现有交直流混合系统<sup>[13]</sup>主要包括混合输电网、混合配电网以及近年来迅速发展起来的混合微电网三大典型混合系统, 求解这些交直流混合系统的潮流计算方法可分为两大类: 交替迭代法<sup>[14-21]</sup>和统一求解法<sup>[22-24]</sup>。交替迭代法由于处理 VSC 控制策略的灵活性以及对单侧潮流计算方法<sup>[25-26]</sup>的良好继承性

基金项目: 国家自然科学基金资助(51467012)

而被广泛采纳。文献[15]提出了一种多端 VSC-HVDC 系统交直流潮流计算算法, 该算法推导了适用于 VSC-MTDC 潮流计算的 VSC 数学模型, 并针对 VSC 的不同控制方案给出其交直流潮流交替求解的接口方程。文献[16]提出了一种基于双向迭代的混合潮流计算方法, 该算法保持了统一迭代法的收敛性, 同时又可在结构上继承交替迭代法控制方式切换简易的特点。文献[17]提出了一种能够满足换流器控制方式转换策略的潮流计算方法, 该算法将控制角余弦值和变压器分接头变比乘积作为一个状态变量处理, 有效地避免了迭代过程中控制角余弦值或变压器分接头越限情况的发生。文献[18]根据 VSC-HVDC 中电压源换流器的控制对象大多为交流侧物理量的特点, 提出了一种交直流混合系统潮流的交替求解算法。

上述采用交替迭代法求解交直流混合系统潮流计算均是在常用 VSC 潮流计算模型下完成的, 有一个共同缺点: 交、直流侧潮流计算需要在两侧多次交替迭代, 而每一次单侧交流或直流潮流计算都需多次迭代才能完成, 降低了潮流计算的效率。文献[19]通过调整 VSC 的有功控制参量, 成功地避开了交流潮流和直流潮流间的多次交替迭代。但该方法需对换流器采用定无功控制策略的交流出口节点无功方程另做额外处理, 在混合系统换流器数目较多的场合, 系统的方程和变量会大大增加。

本文在已有文献研究的基础上, 选用交替迭代法作为求解方法, 对 VSC 的潮流计算模型进行了重塑, 提出了一种新型 VSC 潮流计算模型。该模型在避免交流潮流和直流潮流间多次交替迭代问题的同时还能相应减少混合系统潮流计算的计算量。最后通过算例验证了所提模型在用于求解混合系统潮流计算时的高效性。

### 1 现有 VSC 潮流计算模型

交直流混合系统的一般网络结构如图 1 所示。其中, 含  $N+1$  节点的交流网通过  $L$  个 VSC 与  $M+1$  节点的直流网相连, 通过调整各个 VSC 的控制策略, 可使交直流混合系统工作在不同的运行状态。

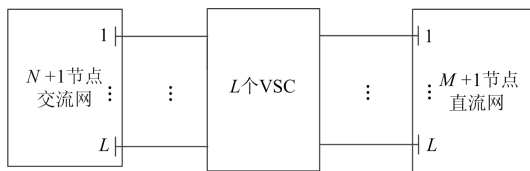


图 1 交直流混合系统的一般网络结构

Fig. 1 General network structure of AC/DC hybrid system

由于单纯的交流系统潮流计算和直流系统潮流计算方法已经较为成熟, 而混合系统潮流计算由于换流器的引入, 使得换流器两侧出口处的功率和电压存在约束关系, 在潮流计算时必须予以考虑, 因此建立高效的 VSC 潮流计算模型是解决混合系统潮流计算的关键。

目前, 常用 VSC 潮流计算模型如图 2 所示。在潮流计算时, 将换流器的损耗等效至交流侧, 用虚拟电阻  $R$  模拟换流器的有功损耗, 用虚拟电抗  $X$  模拟换流器从交流网吸收的无功功率, 并引入一个电压向量为  $U_{a-e}$  的虚拟交流节点  $e$ , 将换流器(②和③组成)等效为一个交流侧阻抗为  $R+jX$  的支路(图 2 中虚线框②)和一个理想换流器(图 2 中虚线框③)的组合。在换流器等效模型中, 节点  $e$  实际上是作为理想换流器的交流出口节点,  $P_{a-e}$  为由节点  $e$  注入理想换流器的有功功率; 交流节点  $f$  为交流网与换流器的交流公共端,  $U_{a-f}$  为节点  $f$  的基波电压向量,  $P_{a-f}+jQ_{a-f}$  为由节点  $f$  注入换流器的复功率, 由于直流侧不包含无功功率, 因此  $Q_{a-f}$  将由虚拟电抗  $X$  完全吸收; 直流节点  $h$  为直流网与换流器的直流公共端, 亦是理想换流器的直流出口节点,  $U_{d-h}$  为直流节点  $h$  的电压,  $P_{d-h}$  为由节点  $h$  注入换流器(理想换流器)的功率。

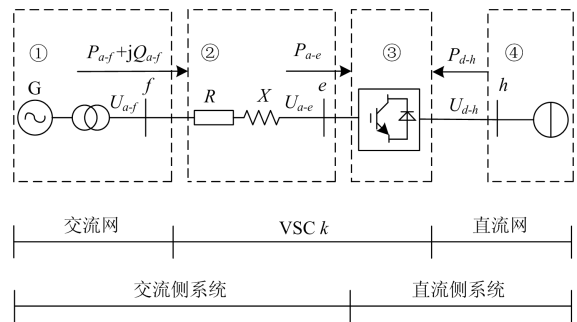


图 2 常用 VSC 潮流计算模型

Fig. 2 Common VSC power flow calculation model

在混合系统潮流计算中, VSC 常用控制策略主要包括: 1) 定  $P_{a-f}$ 、定  $Q_{a-f}$ ; 2) 定  $P_{a-f}$ 、定  $U_{a-f}$ ; 3) 定  $U_{d-h}$ 、定  $U_{a-f}$ ; 4) 定  $U_{d-h}$ 、定  $Q_{a-f}$ 。在采用交替迭代法求解混合系统的潮流时, 通常是将虚拟交流节点  $e$  作为交直流系统的区分界限, 即把虚拟电阻  $R$ 、虚拟电抗  $X$  划分到交流侧系统(即图 2 中虚线框①、②为交流侧系统, 虚线框③、④为直流侧系统)。这样的处理方式能够有效、灵活地处理换流器的不同控制策略, 但也存在其自身难以避免的缺陷, 突出表现在:

缺陷 1 单次的交流侧或者直流侧潮流计算均无

法得到准确的计算结果, 需要在交流侧和直流侧间反复进行交替迭代, 直到两侧潮流都收敛为止, 降低了潮流计算的运算效率。

由于换流器采用的是定  $P_{a-f}$  而非定  $P_{a-e}$  的控制策略以及换流器有功损耗的存在, 使得由节点  $e$  注入理想换流器的有功功率  $P_{a-e}$  无法事先给定, 即直流节点  $h$  的负荷功率无法给定, 因此单次的直流侧潮流计算无法得出准确的直流侧潮流计算结果。

由于单次的直流侧潮流计算结果不是准确值, 因此由平衡换流器(采用定  $U_{d-h}$  方式, 直流侧出口节点  $h$  为直流侧平衡节点)传递到交流侧的功率也不是准确值, 因此单次的交流侧潮流计算也无法得出准确的交流侧潮流计算结果。

缺陷 2 常用 VSC 潮流计算模型是将换流器的损耗等效至交流侧, 混合系统中一个换流器将增加一个交流节点, 对含  $N+1$  个交流节点、 $L$  个 VSC 的混合系统, 系统功率方程和变量都将增加  $2L$  个, 加大了潮流的计算量。

文献[19]在常用 VSC 潮流计算模型基础上将有功控制参量由定  $P_{a-f}$  调整为定  $P_{a-e}$  的控制策略(为了区分, 下文将其称为文献[19]改进模型), 能够有效避免缺陷 1 所述的问题, 但缺陷 2 所述的问题仍然存在, 并且在改进的同时带来了以下问题:

1) 对换流器采用定  $Q_{a-f}$  控制策略的交流节点  $f$ , 由于其注入换流器的无功功率  $Q_{a-f}$  已知, 该节点的无功方程需根据移除交流节点  $e$  后的网络列写, 必须单独考虑, 增加了程序设计的难度;

2) 要将换流器的有功控制参量由定  $P_{a-f}$  精确地调整到定  $P_{a-e}$  也显得十分困难, 影响了潮流计算的精度。

## 2 新型 VSC 潮流计算模型

本文针对常用 VSC 潮流计算模型和文献[16]改进模型存在的缺陷, 从避免或弥补这些缺陷的角度出发, 对换流器的潮流计算模型进行重塑, 将换流器的有功损耗等效至直流侧, 提出一种新型 VSC 潮流计算模型, 如图 3 所示。

新型 VSC 潮流计算模型主要是对换流器做了以下四个方面规定:

1) 引入一个电压为  $U_{d-t}$  的虚拟直流出口节点  $t$ , 该节点注入理想换流器的功率为  $P_{d-t}$ , 同时将该节点作为交直流系统的区分界限(即图 3 中虚线框①、③为交流侧系统, 虚线框②、④为直流侧系统);

2) 在节点  $t$  和节点  $h$  之间用虚拟电阻  $R'$  模拟换流器的有功损耗;

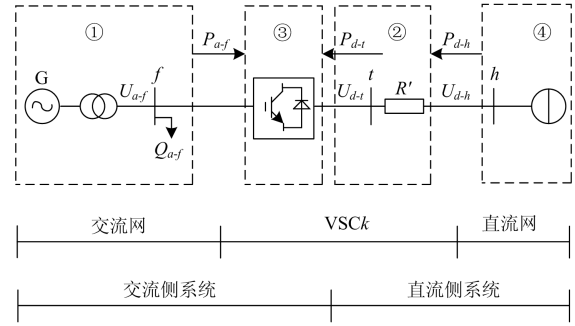


图 3 新型 VSC 潮流计算模型

Fig. 3 New VSC power flow calculation model

3) 将  $P_{a-f}$  处理为交、直流两侧系统的线路传输有功功率, 对单侧系统均可视为相应节点的负荷或电源;

4) 将  $Q_{a-f}$  处理为节点  $f$  的无功负荷, 模拟换流器吸收的无功功率。

下面对新型 VSC 潮流计算模型做几点说明和分析。

1) 对于采用定  $U_{d-h}$  控制策略的换流器, 节点  $h$  在直流侧系统中充当平衡节点的角色, 因此其增加的虚拟直流出口节点  $t$  和节点  $h$  都无需参与直流侧潮流计算, 节点  $t$  的功率  $P_{d-t}$  和电压  $U_{d-t}$  可分别采用式(1)和式(2)计算得到。

$$P_{d-t} = P_{d-h} + \Delta P_{VSCk} = P_{d-h} + \frac{P_{d-h}^2}{U_{d-h}^2} R' \quad (1)$$

式中,  $\Delta P_{VSCk}$  为 VSCk 的有功损耗。

$$U_{d-t} = U_{d-h} + \Delta U_{d-t} = U_{d-h} + \frac{P_{d-h}}{U_{d-h}} R' \quad (2)$$

式中,  $\Delta U_{d-t}$  为节点  $t$  和节点  $h$  之间的电压损耗。

2) 新型 VSC 潮流计算模型是将换流器的损耗等效至直流侧, 混合系统中一个换流器将增加一个直流节点, 对含  $M+1$  个交流节点、 $L$  个 VSC 的混合系统, 系统功率方程和变量增加  $L$  个, 仅为常用 VSC 潮流计算模型和文献[19]改进模型的 1/2。因此在含大规模 VSC 的混合系统中, 采用新型 VSC 潮流计算模型的计算量要小得多。

3) 节点  $f$  变成了换流器的交流出口节点, 使得换流器的有功控制参量  $P_{a-f}$  直接成为交直流两侧系统的有功传输功率, 从而避免了交直流两侧系统间的多次交替迭代, 直流侧潮流和交流侧潮流只需依次进行一次即可得到准确的潮流计算结果。

4) 新型 VSC 潮流计算模型中, 处理 VSC 的四种常用控制策略极为方便, 均可将相应的出口节点等效为电力系统的常规节点类型, 在潮流计算时按照常规处理方法即可。



### 3 新型 VSC 潮流计算模型的基本方程

在交直流混合系统中，换流器的作用是作为交流侧系统和直流侧系统的能量转换和传递装置，建立起两侧系统功率和电压的约束关系。

图 3 中，新型 VSC 潮流计算模型的基本方程包括式(3)一式(6)。

VSC  $k$  的有功损耗  $\Delta P_{VSCk}$  可表示为

$$\Delta P_{VSCk} = P_{d-t} - P_{d-h} = \frac{P_{d-h}^2}{U_{d-h}^2} R' = \frac{P_{d-t}^2}{U_{d-t}^2} R' \quad (3)$$

节点  $f$  注入 VSC  $k$  的无功功率  $Q_{a-f}$  被 VSC  $k$  全部吸收，因此 VSC  $k$  的无功损耗  $\Delta Q_{VSCk}$  可表示为

$$\Delta Q_{VSCk} = Q_{a-f} = \frac{P_{a-f}^2 + Q_{a-f}^2}{U_{a-f}^2} X \quad (4)$$

换流器两侧的功率和出口电压满足式(5)和式(6)。

$$P_{a-f} = -P_{d-t} \quad (5)$$

$$U_{a-f} = \mu_k T_k U_{d-h} \quad (6)$$

式中： $\mu_k$  为直流电压吸收比； $T_k$  为 VSC  $k$  的电压调制比。

图 2 的常用 VSC 潮流计算模型中， $\Delta P_{VSCk}$  可表示为

$$\Delta P_{VSCk} = P_{a-f} - P_{a-e} = \frac{P_{a-f}^2 + Q_{a-f}^2}{U_{a-f}^2} R = \frac{P_{a-e}^2}{U_{a-e}^2} R \quad (7)$$

由式(3)和式(7)可得出两种 VSC 潮流计算模型中损耗电阻  $R$  和  $R'$  的转换关系为

$$R = \frac{P_{d-t}^2}{P_{a-f}^2 + Q_{a-f}^2} \frac{U_{a-f}^2}{U_{d-t}^2} R' = \frac{P_{d-h}^2}{P_{a-f}^2 + Q_{a-f}^2} \frac{U_{a-f}^2}{U_{d-h}^2} R' \quad (8)$$

常用 VSC 潮流计算模型中虚拟电抗  $X$  可由新型 VSC 潮流计算模型参量计算得到，如式(9)所示。

$$X = \frac{U_{a-f}^2 Q_{a-f}}{P_{a-f}^2 + Q_{a-f}^2} \quad (9)$$

式(8)和式(9)说明两种 VSC 潮流计算模型能够相互转化，也就从理论上证明了所提新型 VSC 潮流计算模型的正确性。

### 4 交直流混合系统潮流计算

基于新型 VSC 潮流计算模型的混合系统潮流计算，采用交替迭代法求解时，可以很好地继承现有成熟的单侧潮流计算方法，在此不再赘述，读者可根据混合系统的网络特性自行选择相应的求解方法，比如输电网采用 PQ 分解法，配电网采用前推回代法等。

采用基于新型 VSC 潮流计算模型求解混合系

统潮流计算时，交、直流两侧的潮流计算都只需进行一次即可得到准确的潮流计算结果，可避免交直流侧系统间的多次交替迭代，但求解时必须注意交、直流两侧潮流计算的求解顺序。由于直流侧系统至少存在一个平衡换流器，其由节点  $h$  注入的功率  $P_{d-h}$  未知，因此必须首先进行直流侧系统的潮流计算，得到  $P_{d-h}$  的准确值后再根据式(1)和式(5)得到  $P_{a-f}$  的值，并将该值计入节点  $f$  的有功负荷，即可完成交流侧的潮流计算。

### 5 算例分析

为了验证本文所提 VSC 潮流计算模型的有效性和合理性，在 Matlab R2016a 平台上编制了相应的计算机程序，在 IEEE9 节点系统基础上增加一个 6 节点的环形直流环节，同时对 IEEE9 节点系统的节点注入功率进行调整，形成一个含 6 个 VSC 的交直流混合系统。为了对潮流计算结果进行对比和分析，分别采用常用 VSC 模型、文献[19]改进模型和本文 VSC 模型对该交直流混合系统进行了潮流计算。其中，交流侧潮流计算采用 PQ 分解法，直流侧潮流计算采用文献[19]方法。

基于 IEEE9 节点改造的混合系统如图 4 所示，各 VSC 的控制策略如表 1 所示，改造的混合系统节点数据如表 2 所示。其中，节点 1 为交流侧系统平

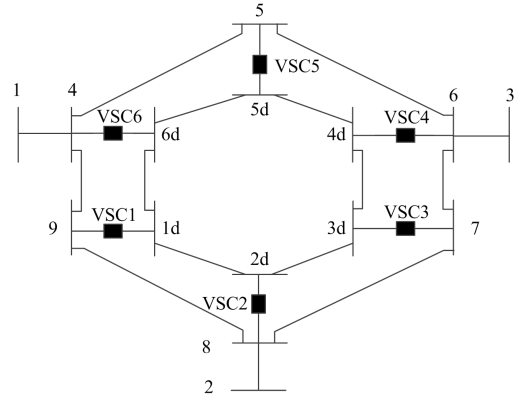


图 4 基于 IEEE9 节点改造的混合系统

Fig. 4 Hybrid system based on IEEE9 node transformation

表 1 VSC 的控制策略及参数

Table 1 Control strategies and parameters of VSC

换流器	$R'/p.u.$	控制策略参数/p.u.	
VSC1	0.005 0	$U_{d-1}=1.045$	$Q_{a-9}=0.16$
VSC2	0.005 0	$P_{a-8}=0.6$	$Q_{a-8}=0.1$
VSC3	0.005 0	$P_{a-7}=0.4$	$U_{a-7}=1.015$
VSC4	0.005 0	$P_{a-6}=0.9$	$Q_{a-6}=0.2$
VSC5	0.005 0	$P_{a-5}=0.7$	$Q_{a-5}=0.15$
VSC6	0.005 0	$P_{a-4}=0.5$	$Q_{a-4}=0.12$

表 2 基于 IEEE9 节点改造的混合系统节点数据

Table 2 Node data of hybrid system based on IEEE9 node transformation

节点	注入有功功率/p.u.	注入无功功率/p.u.
2	1.000 0	\
3	0.850 0	\
4	-1.300 0	-0.400 0
5	0.000 0	0.000 0
6	-0.900 0	-0.300 0
7	0.000 0	\
8	-0.600 0	-0.200 0
9	0.000 0	0.000 0
2d	-0.600 0	\
3d	-0.500 0	\
4d	-1.000 0	\
5d	-0.800 0	\
6d	-0.700 0	\

衡节点, 节点 2、3 为 PV 节点, 其给定的电压幅值分别为  $U_{a-1}=1.040 0$ ,  $U_{a-2}=1.025 0$ ,  $U_{a-3}=1.025 0$ 。直流系统的电阻分别为:  $R_{d12}=0.051$ ,  $R_{d23}=0.049$ ,  $R_{d34}=0.049$ ,  $R_{d45}=0.055$ ,  $R_{d56}=0.05$ ,  $R_{d61}=0.04$ 。

表 3 中给出了采用三种模型对基于 IEEE9 节点改造的混合系统潮流计算的结果对比, 三种模型所得的结果完全吻合, 证明了本文所提模型的正确性

表 3 基于 IEEE9 节点改造的混合系统潮流计算结果

Table 3 Power flow calculation results of hybrid system based on IEEE9 node transformation

节点	常用 VSC 模型 <sup>[12]</sup>		文献[16]改进 VSC 模型		所提 VSC 模型	
	电压幅值/p.u.	电压相角/rad	电压幅值/p.u.	电压相角/rad	电压幅值/p.u.	电压相角/rad
1	1.040 0	0.000 0	1.040 0	0.000 0	1.040 0	0.000 0
2	1.025 0	-0.448 6	1.025 0	-0.448 6	1.025 0	-0.448 6
3	1.025 0	-0.514 7	1.025 0	-0.514 7	1.025 0	-0.514 7
4	0.994 2	-0.263 9	0.994 2	-0.263 9	0.994 2	-0.263 9
5	0.985 5	-0.412 7	0.985 5	-0.412 7	0.985 5	-0.412 7
6	0.999 5	-0.563 4	0.999 5	-0.563 4	0.999 5	-0.563 4
7	1.015 0	-0.549 4	1.015 0	-0.549 4	1.015 0	-0.549 4
8	1.009 5	-0.509 0	1.009 5	-0.509 0	1.009 5	-0.509 0
9	0.996 8	-0.378 2	0.996 8	-0.378 2	0.996 8	-0.378 2
1d	1.045 0	\	1.045 0	\	1.045 0	\
2d	1.036 2	\	1.036 2	\	1.036 2	\
3d	1.027 8	\	1.027 8	\	1.027 8	\
4d	1.024 2	\	1.024 2	\	1.024 2	\
5d	1.025 7	\	1.025 7	\	1.025 7	\
6d	1.032 1	\	1.032 1	\	1.032 1	\

## 6 结论

本文详细分析了常用 VSC 潮流计算模型采用交替迭代法求解混合系统潮流计算出现多次交替迭

和有效性。采用常用 VSC 模型时, 系统功率方程和变量数为 30 个, 交、直流侧间经过 3 次的交替迭代, 其中直流侧系统各次迭代次数分别为 5、5、5, 交流侧系统各次迭代次数分别为 7、7、7, 收敛总时间为 2.426 ms; 采用文献[19]改进模型时, 系统功率方程和变量数也为 30 个, 交、直流侧间无需交替迭代, 直流侧系统经过 5 次迭代收敛, 交流侧系统经过 7 次迭代收敛, 收敛总时间为 1.516 ms; 采用所提模型时, 系统功率方程和变量数为 24 个, 交、直流侧间也无需交替迭代, 直流侧系统经过 5 次迭代收敛, 交流侧系统经过 7 次迭代收敛, 收敛总时间为 1.204 ms。

在本算例中, 采用所提模型与文献[19]改进模型均无需交、直流侧间的多次交替迭代, 迭代总次数仅为常用 VSC 模型的 1/3; 采用所提模型的功率方程和变量数比常用 VSC 模型和文献[19]改进模型少 6 个(混合系统包含 6 个 VSC), 因此计算量是三种模型中最小的, 所需的收敛时间也是三种模型中最少的, 提高了计算效率。相比于常用 VSC 模型和文献[19]改进模型潮流计算中一个 VSC 增加 2 个方程和变量, 所提模型中一个 VSC 只增加 1 个方程和变量。因此, 在含大规模 VSC 的混合系统潮流计算中, 所提模型计算量小的优势将充分体现, 可大大提高计算效率。

代的原因, 在此基础上对 VSC 潮流计算模型进行重塑, 提出了一种新型 VSC 潮流计算模型。模型中将 VSC 的有功损耗等效至直流侧, 并重新对交直流系

统设定区分界限, 在避免了交流潮流和直流潮流间多次交替迭代问题的同时也相应减少了混合系统潮流计算的计算量。该模型处理 VSC 的四种常用控制策略极为方便, 均可将相应的出口节点等效为电力系统的常规节点类型, 在潮流计算时按照常规方法处理即可。算例结果表明了所提模型有效性, 尤其适用于含大规模 VSC 的混合系统潮流计算。

### 参考文献

- [1] 刘嘉超, 袁志昌, 李岩, 等. 柔性直流技术在负荷中心分网运行的应用[J]. 电网技术, 2016, 40(3): 683-688.  
LIU Jiachao, YUAN Zhichang, LI Yan, et al. Application of VSC-HVDC technology in synchronous system segmentation of load center[J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 683-688.
- [2] 严道, 焦彦军, 杜哲. 基于柔性直流技术的一种交直流混合配电网可行性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(13): 110-116.  
YAN Xiao, JIAO Yanjun, DU Zhe. Feasibility study of AC/DC hybrid distribution network using VSC-based DC technology[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(13): 110-116.
- [3] 张洪明, 仲建中, 廖培鸿. 城市地下输电方式研究[J]. 电力系统自动化, 1996, 22(10): 52-55.  
ZHANG Hongming, ZHONG Jianzhong, LIAO Peihong. The research of metropolis underground power transmission[J]. Automation of Electric Power Systems, 1996, 22(10): 52-55.
- [4] 王裕霜. 国内外海底电缆输电工程综述[J]. 南方电网技术, 2012, 6(2): 26-30.  
WANG Yushuang. Review on submarine cable projects for power transmission worldwide[J]. Southern Power System Technology, 2012, 6(2): 26-30.
- [5] 刘舒, 李正力, 王翼, 等. 含分布式发电的微电网中储能装置容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 78-84.  
LIU Shu, LI Zhengli, WANG Yi, et al. Optimal capacity allocation of energy storage in micro-grid with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 78-84.
- [6] 文娟, 谭阳红, 何怡刚, 等. 含分布式电源的复杂配电网多阶段故障恢复方法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(14): 3332-3341.  
WEN Juan, TAN Yanghong, HE Yigang, et al. Multi-Stage Service Restoration Method for Complex Distribution Networks with Distributed Generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(14): 3332-3341.
- [7] 杨晓东, 张有兵, 蒋杨昌, 等. 微电网下考虑分布式电源消纳的电动汽车互动响应控制策略[J]. 电工技术学报, 2018, 33(2): 390-400.  
YANG Xiaodong, ZHANG Youbing, JIANG Yangchang, et al. Renewable Energy Accommodation-Based Strategy for Electric Vehicle Considering Dynamic Interaction in Microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(2): 390-400.
- [8] 汤广福, 贺之渊, 滕乐天, 等. 电压源换流器高压直流输电技术最新研究进展[J]. 电网技术, 2008, 32(22): 39-44.  
TANG Guangfu, HE Zhiyuan, TENG Letian, et al. New progress on HVDC technology based on voltage source converter[J]. Power System Technology, 2008, 32(22): 39-44.
- [9] 刘建涛, 王治华, 王珂. 不同结构电压源换流器损耗对比分析[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(6): 105-110.  
LIU Jiantao, WANG Zhihua, WANG Ke. Comparative analysis of losses of voltage source converters with different structures[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(6): 105-110.
- [10] 温家良, 吴锐, 彭畅, 等. 直流电网在中国的应用前景分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(13): 7-12.  
WEN Jialiang, WU Rui, PENG Chang, et al. Analysis of DC grid prospects in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(13): 7-12.
- [11] 孙玉娇, 周勤勇, 申洪. 未来中国输电网发展模式的分析与展望[J]. 电网技术, 2013, 37(7): 1929-1935.  
SUN Yujiao, ZHOU Qinyong, SHEN Hong. Analysis and prospect on development patterns of China's power transmission network in future[J]. Power System Technology, 2013, 37(7): 1929-1935.
- [12] 马钊, 周孝信, 尚宇炜, 等. 未来配电系统形态及发展趋势[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(6): 1289-1298.  
MA Zhao, ZHOU Xiaoxin, SHANG Yuwei, et al. Form and development trend of future distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(6): 1289-1298.
- [13] 王家融, 艾欣, 王坤宇, 等. 基于增广雅可比矩阵的交直流解耦潮流新算法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(6): 1382-1389.  
WANG Jiarong, AI Xin, WANG Kunyu, et al. A Novel AC-DC Decoupled Power Flow Calculation Method Based on the Augmented Jacobian Matrix[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(6): 1382-1389.
- [14] LI Gengyin, ZHOU Ming, HE Jie, et al. Power flow

- calculation of power systems incorporating VSC-HVDC[C] // Proceedings of International Conference on Power Singapore System Technology, November 21-24, 2004, Singapore, Singapore: 1562-1566.
- [15] 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, 25(6): 1-6.  
CHEN Qian, TANG Guoqing, WANG Xun. AC-DC power flow algorithm for multi-terminal VSC-HVDC systems[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(6): 1-6.
- [16] 薛振宇, 房大中. 基于双向迭代的交直流互联电力系统潮流计算[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(5): 61-67.  
XUE Zhenyu, FANG Dazhong. A power flow calculation algorithm for AC/DC interconnected power systems based on bi-directional iteration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(5): 61-67.
- [17] 陈厚合, 李国庆, 姜涛. 分控制方式转换策略下的改进交直流系统潮流算法[J]. 电网技术, 2011, 35(8): 93-98.  
CHEN Houhe, LI Guoqing, JIANG Tao. A modified power flow algorithm for AC/DC power system under transformation strategy of converter control modes[J]. Power System Technology, 2011, 35(8): 93-98.
- [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, 25(6): 1-5.  
ZHENG Chao, ZHOU Xiaoxin, LI Ruomei, et al. Study on the steady characteristic and algorithm of power flow for VSC-HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(6): 1-5.
- [19] 吴志远, 殷正刚, 唐西胜. 混合电网的交直流解耦潮流算法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(4): 937-944.  
WU Zhiyuan, YIN Zhenggang, TANG Xisheng. An AC/DC decoupled hybrid power flow algorithm for hybrid power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(4): 937-944.
- [20] 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.
- [21] WANG W Y, BARNES M. Power flow algorithms for multi-terminal VSC-HVDC with droop control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(4): 1721-1730.
- [22] 吴素农, 于金镒, 田庄, 等. 基于扩展节点法的交直流混合电网统一潮流算法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(14): 40-47.  
WU Sunong, YU Jinyi, TIAN Zhuang, et al. A unified power flow algorithm for AC/DC hybrid networks using modified augmented nodal analysis[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(14): 40-47.
- [23] BARADAR M, GHANDHARI M. A multi-option unified power flow approach for hybrid AC/DC grids incorporating multi-terminal VSC-HVDC[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 2376-2383.
- [24] ARIFOGLU U. The power flow algorithm for balanced and unbalanced bipolar multiterminal AC/DC systems[J]. Electric Power System Research, 2003, 64(3): 239-246.
- [25] 敖鑫, 王淳, 蔡恒, 等. 计及接地支路的直流潮流算法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(16): 8-15.  
AO Xin, WANG Chun, CAI Heng, et al. DC power flow algorithm considering grounding branches[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(16): 8-15.
- [26] 扈诗扬, 杨萌, 汪芳宗. 基于坐标旋转变换的配电系统快速解耦潮流计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(4): 40-44.  
HU Shiyang, YANG Meng, WANG Fangzong. A fast decoupled load flow method for distribution system via coordinate rotation transformation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(4): 40-44.

收稿日期: 2018-05-28; 修回日期: 2018-08-19

作者简介:

陈宇杰(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统潮流计算及微电网运行控制; E-mail: 1505193695@qq.com

王淳(1963—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统规划、优化理论在电力系统中的应用。E-mail: cwang\_ncu\_cn@163.com

(编辑 周金梅)