

考虑VSC容量约束的直流配电网线性潮流算法

黄学劲¹, 喻松涛², 王之谦³, 罗旭恒¹, 刘贯科¹, 戴喜良¹

(1. 广东电网有限责任公司东莞供电局, 广东 东莞 523008; 2. 直流输电技术全国重点实验室(南方电网科学研究院), 广州 510663; 3. 智能电网教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072)

摘要: 基于电压源换流器(voltage source converters, VSCs)的直流配电网可以自动调整过载VSC的控制策略以适应可再生能源功率的变化, 但增加了直流配电网稳态潮流分析的难度。因此, 提出了一种分段线性潮流(piecewise linear power flow, PLPF)算法以快速计算功率扰动和VSC控制策略调整对稳态潮流的耦合影响。首先, 根据VSC功率平衡, 直接计算得到VSC达到容量极限的临界点, 进而计算得到VSC控制策略调整前各节点的功率变化量。然后, 考虑VSC控制策略调整, 对线性潮流模型进行修正。最后, 对VSC控制策略调整前后各个阶段进行线性潮流计算, 利用叠加法得到稳态潮流。仿真结果表明, 所提出的PLPF模型能直接快速准确地计算出直流配电网稳态潮流分布。

关键词: 直流配电网; 下垂控制; 线性潮流模型; 分段模型; 电压源换流器

Linear Power Flow Algorithm of DC Distribution Networks Considering VSC Capacity Constraints

HUANG Xuejin¹, YU Songtao², WANG Zhiqian³, LUO Xuheng¹, LIU Guanke¹, DAI Xiliang¹

(1. Dongguan Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Dongguan, Guangdong 523008, China; 2. State Key Laboratory of HVDC, Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510663, China; 3. Key Laboratory of the Ministry of Education on Smart Power Grids, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Voltage source converters (VSCs)-based DC distribution networks (DCDNs) can automatically adjust the control strategy of overloaded VSC to adapt to the variation of renewable energy power, but it brings difficulties to analyze the steady-state performance of DCDNs. A piecewise linear power flow (PLPF) algorithm is proposed to quickly calculate the coupled effect of the power disturbance and VSC control strategy adjustment on steady-state power flow. Firstly, according to the VSC power balance, the critical point of VSC hitting the capacity limit is directly determined and the power variations of each node before VSC control strategy adjustment are obtained. Then, the linear power flow is revised considering the VSC control strategy adjustment. Finally, the linear power flow calculation is performed in each stage before VSC control strategy adjustment, and the steady-state power flow is obtained by using the superposition method. Simulation results show that the proposed PLPF model can directly, quickly, and accurately calculate the steady-state power flow distribution of DCDNs.

Key words: DC distribution network; droop control; linear power flow model; piecewise model; voltage source converter

0 引言

可再生能源的大规模并网促进了基于电压源换

流器(voltage source converters, VSC)的高压直流(high voltage direct current, HVDC)技术的发展^[1-5]。随着直流技术的不断成熟一系列HVDC实际工程投入使用, 有效促进了新能源的高效利用^[6-8]。

在配网侧, 随着分布式光伏(photovoltaic, PV)和电动汽车(electric vehicle, EV)充电桩的快速发展, 大量逆变器接入配电网, 功率变换过程产生了大量的电能损耗^[9]。基于VSC的直流配电网(DC

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFE0205100); 中国南方电网有限责任公司科技项目(031986WP20200031)。

Foundation item: Supported by the National Key Research and Development Program of China (2022YFE0205100); the Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd. (031986WP20200031).

distribution network, DCDN)能有效减少变流环节,提高能源利用效率^[10]。同时,DCDN还具有供电可靠性高、电能质量好、光伏和电动汽车接纳容量大等优势^[11-12]。

直流配电网中,VSC输出电压是影响系统电压水平和潮流分布的关键因素。在主从控制的直流配电网中,定电压控制和定功率控制分别保持VSC输出电压和输出功率恒定^[13]。下垂控制中VSC输出电压随VSC输出功率的变化而变化。当负载功率或光伏功率随机变化时,所有下垂控制VSC同时调节输出电压以分担功率变化^[14]。下垂控制凭借高可靠性和高灵活性的优点成为直流配电网研究的热点^[13]。

潮流计算(power flow calculation, PFC)可以得到直流系统的电压和功率分布情况,计算精度高^[16-17]。但在实时分析和控制等对计算速度要求较高的应用场景下,精确潮流计算无法有效满足快速性的要求^[18]。与精确潮流计算相比,线性潮流(linear power flow, LPF)算法可以直接计算稳态直流电压和功率变化,并在电力系统中得到广泛应用^[19]。文献[20-21]通过利用等效电阻来表示下垂控制对潮流的影响,提出了下垂控制直流配电网的线性潮流模型。文献[22]针对下垂控制直流电网提出了节点功率对电压的线性灵敏度模型,并应用二次修正项来提高线路损耗的计算精度。文献[23]基于泰勒展开构建了VSC的稳态模型,提出了双极直流配电网的线性潮流计算方法。

上述线性潮流模型中针对VSC控制策略不变的情况,随着直流配电技术的推广应用,直流配电网的运行环境日趋复杂。为了提高直流配电系统的投资经济性,通常不宜在规划阶段设置较大的换流器容量裕度。考虑到直流配电系统中高比例风光等新能源输出功率的随机变化特性会出现换流器传输功率达到限制值的情形^[24],VSC的控制策略由下垂控制转换为定功率控制以避免VSC传输功率超过容量限值^[25-26]。此时,传统的考虑VSC控制策略不变得到的线性潮流模型无法保证准确性。对此,文献[26]通过节点功率二分法计算VSC达到容量极限时的系统运行临界点,并采用叠加方法计算直流系统的稳态潮流分布。然而,二分法需要多次迭代,增加了模型复杂度和计算时间,限制了线性潮流模型的应用。

本文针对直流配电系统中换流器控制策略切换导致的潮流分析复杂的问题,提出了一种分段线性潮流(piecewise linear power flow, PLPF)算法,可以快速计算功率扰动和VSC控制策略调整对稳态潮流的耦合影响。根据VSC功率平衡关系直接计算得到VSC达到容量极限的临界点,进而计算得到VSC控制策略调整前各节点的功率变化量,对VSC控制策略调整前后各个阶段进行线性潮流计算,利用叠加法得到稳态潮流参数。仿真结果表明,所提出的PLPF模型具有计算精度高、计算速度快的特点。

1 线性潮流模型

1.1 DCDN的控制策略

在直流配电系统中,VSC交流侧控制策略主要包括定交流电压控制和定交流功率控制,VSC直流侧控制策略包括定电压控制、定功率控制和下垂控制。图1为VSC直流侧控制系统示意图。对于位于节点 n 的VSC,VSC的输出电压 U_n 和输出功率 $P_{n,VSC}$ 之间的关系可以表示为:

$$U_n = U_{n,ref} - k_n (P_{n,VSC} - P_{n,ref}) \quad (1)$$

式中: $U_{n,ref}$ 与 $P_{n,ref}$ 分别为节点 n 处VSC的运行参考电压和运行参考功率; k_n 为节点 n 处VSC的下垂系数。当 k_n 取值为0时,VSC为定电压控制;当 k_n 取值为无穷大时,VSC为定功率控制。

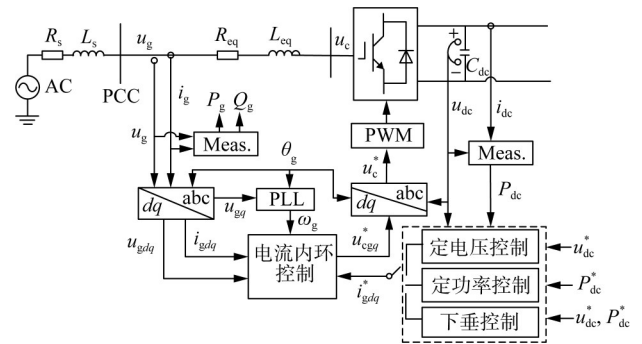


图1 VSC控制系统示意图

Fig. 1 Diagram of VSC control system

1.2 不同控制策略的VSC广义潮流模型

如图2所示,采用文献[27]中提出的等效线路模型来表示下垂节点、恒压节点和恒功率节点。

不同VSC控制模式的等效线路模型参数如表1所示。VSC控制策略可以用3个参数来表示,包括理想电压源的电压、线路电阻和等效节点功率。当

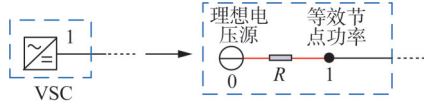


图2 VSC潮流模型

Fig. 2 Power flow model for VSC

下垂控制的VSC达到容量极限并以其容量值输出恒定功率时，线路电阻设置为无穷大，等效节点功率设置为其容量。

表1 直流侧不同控制策略的等效线路参数

Tab. 1 Equivalent line parameters for different DC side control strategies

控制模型	理想电压源电压	线路电阻	等效节点功率
下垂控制	参考电压	下垂系数与参考电压的乘积	负参考功率
定电压控制	参考电压	0	负最大功率
定功率控制	参考电压	∞	负参考功率

1.3 线性潮流模型

直流配电系统潮流模型可以表示为^[22]:

$$\begin{cases} P_{i,PV} - P_{i,L} + U_i \sum_{j=1}^h g_{ij} U_j = 0, i \in M_L \\ -\frac{U_n - U_{n,ref}}{k_n} + P_{n,ref} + U_n \sum_{j=1}^h g_{nj} U_j = 0, n \in M_D \end{cases} \quad (2)$$

式中： $P_{i,PV}$ 和 $P_{i,L}$ 分别为节点 i 的PV输出功率和负载功率； g_{ij} 为节点 i 到节点 j 的线路导纳； g_{nj} 为节点 n 到节点 j 的线路导纳； U_i 和 U_j 分别为节点 i 和节点 j 的电压； h 为节点数量； M_L 为负载节点的集合； M_D 为下垂节点的集合。

由节点注入功率变化而引起的节点电压变化可以表示为：

$$\Delta U = -J^{-1} \Delta P = S \Delta P \quad (3)$$

式中： J 为雅可比矩阵； S 为节点电压灵敏度矩阵； ΔP 为节点注入功率的变化； ΔU 为节点电压的变化。

线路 l_{ij} 的线路功率 P_{ij} 可以表示为^[22]:

$$P_{ij} = U_i (U_i - U_j) g_{ij} \quad (4)$$

因节点注入功率变化引起的线路功率变化为：

$$\Delta P_L = G \Delta U = G S \Delta P = T \Delta P \quad (5)$$

式中： ΔP_L 为线路功率的变化； T 为节点注入功率对线路传输功率的灵敏度矩阵； G 为电压相对于线路功率的导数。

VSC功率变化 ΔP_{VSC} 等于与VSC相连的所有线

路的功率变化之和，VSC功率的线性潮流模型为：

$$\Delta P_{VSC} = \sum \Delta P_L = W \Delta P \quad (6)$$

式中 W 为节点注入功率对VSC功率的灵敏度。

2 考虑VSC容量约束的分段线性潮流模型

2.1 考虑VSC容量约束的潮流分析

以图3所示双端下垂控制直流配电为例，说明VSC传输功率到达限制值，下垂控制调整为定功率控制对潮流分布的影响。VSC功率和节点电压的变化如图4所示，横坐标表示光伏功率变化，纵坐标表示VSC传输功率变化。

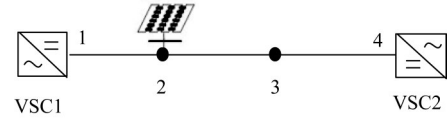


图3 简易两端DCDN示意图

Fig. 3 Diagram of simple two-terminal DCDN

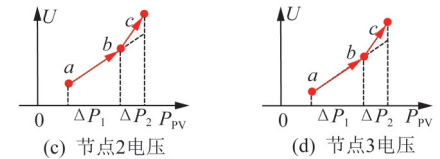
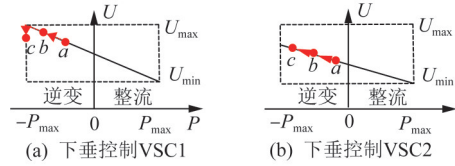


图4 控制策略调整对潮流的影响

Fig. 4 Influence of control strategy adjustment on power flow

由图4可知，随着PV功率的增加，运行点从 a 到 b 到 c 进行变化。如图4所示，在PV功率增加初期，两个下垂控制VSC的功率同时增加以分担PV功率变化，运行点从 a 变化到 b 。随着PV输出功率的进一步增加，其中一个VSC达到容量极限，并保持定功率运行，运行点从 b 变化到 c 。

2.2 分段线性潮流模型

结合图4可知，VSC控制模式调整引起的电压和功率变化过程可分为不同阶段。在每个阶段，可以使用对应的线性潮流模型来计算电压和VSC功率的变化。

分段线性潮流算法的难点在于如何计算不同阶段各个节点的功率变化量。文献[26]采用二分法计算不同阶段各个节点的功率变化量，但是二分法需

要多次迭代,计算时间长。本文根据VSC功率平衡,通过式(6)中的灵敏度矩阵直接计算每个阶段的节点功率变化。所提出的分段线性潮流算法的主要过程包括以下步骤。

步骤1:建立初始线性潮流模型;

步骤2:通过初始线性潮流模型计算每个VSC的功率;

步骤3:如果所有VSC功率都在容量范围内,则根据线性潮流模型计算线路功率和节点电压的变化,并转至步骤8;否则转至步骤4;

步骤4:计算VSC控制策略调整前后的节点功率变化;

步骤5:更新VSC控制策略调整后的线性潮流模型;

步骤6:计算VSC控制策略调整前后VSC功率、线路功率和节点电压的变化;

步骤7:计算VSC功率、线路功率和节点电压;

步骤8:输出计算结果。

分段潮流计算方法的流程图如图5所示。

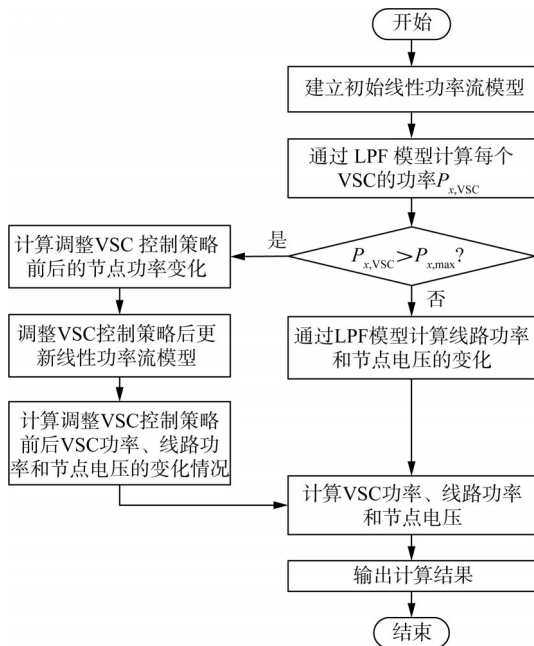


图5 分段潮流计算方法流程图

Fig. 5 Flow chart of the PLPF calculation

上述步骤的详细说明如下。

在步骤1中,进行潮流计算以获得节点电压和线路功率,建立由式(3)、(5)和(6)表示的线性潮流模型。

流模型。

在步骤2中,当节点功率变化后,位于节点 x 处VSC的功率 P_x 为:

$$P_x = P_{x,ini} + \Delta P_x = P_{x,ini} + \sum_{i=1}^h W_{i,x} \Delta P_i \quad (7)$$

式中: $P_{x,ini}$ 为位于节点 x 处VSC的初始功率; ΔP_x 为位于节点 x 处VSC的功率变化量; ΔP_i 为节点 i 处的节点功率变化量; $W_{i,x}$ 为节点 i 处功率变化对节点 x 处VSC功率的灵敏度。

在步骤3中,线路功率和节点电压可以表示为:

$$P_l = P_{l,ini} + \sum_{i=1}^h T_{i,l} \Delta P_i \quad (8)$$

$$U_j = U_{j,ini} + \sum_{i=1}^h S_{i,j} \Delta P_i \quad (9)$$

式中: P_l 为线路 l 的功率; $P_{l,ini}$ 为线路 l 的初始功率; $U_{j,ini}$ 为节点 j 的初始电压; $T_{i,l}$ 为节点 i 的节点注入功率对线路 l 的传输功率灵敏度; $S_{i,j}$ 为节点 i 的节点注入功率对节点 j 的电压灵敏度。

在步骤4中,假设位于节点 x 处VSC的功率大于容量,VSC控制策略调整前的功率变化为:

$$P_{x,ini} + \alpha \sum_{i=1}^h W_{i,x} \Delta P_i = P_{x,max} \quad (10)$$

式中: α 为VSC控制策略调整前功率变化的比例; $P_{x,max}$ 为节点 x 处VSC的容量。

式(10)中, α 可以表示为:

$$\alpha = \begin{cases} 1, & \text{所有VSC都在功率限制内} \\ \frac{P_{x,max} - P_{x,ini}}{\sum_{i=1}^h W_{i,x} \Delta P_i}, & \text{节点}x\text{处VSC超出功率限制} \end{cases} \quad (11)$$

在步骤5中,将VSC从下垂控制变为定功率控制时,下垂系数设置为无穷大,并更新线性潮流模型。

在步骤6中,功率变化可以分为不同的阶段。VSC功率、线路功率和节点电压可以表示为:

$$\Delta P_x = \alpha \sum_{i=1}^h W_{i,x} \Delta P_i + (1 - \alpha) \sum_{i=1, i \neq x}^h W_{i,x,s2} \Delta P_i \quad (12)$$

$$\Delta P_l = \alpha \sum_{i=1}^h T_{i,l} \Delta P_i + (1 - \alpha) \sum_{i=1, i \neq x}^h T_{i,l,s2} \Delta P_i \quad (13)$$

$$\Delta U_j = \alpha \sum_{i=1}^h S_{i,j} \Delta P_i + (1 - \alpha) \sum_{i=1, i \neq x}^h S_{i,j,s2} \Delta P_i \quad (14)$$

式中: ΔP_x 为节点 x 处VSC的功率变化量; ΔP_l 为线

路 l 的功率变化量; ΔU_j 为节点 j 的电压变化量; $W_{i,x,s2}$ 为 VSC 控制策略改变后节点 i 的节点注入功率对节点 x 处 VSC 的传输功率灵敏度; $T_{i,l,s2}$ 为 VSC 控制策略改变后节点 i 的节点注入功率对线路 l 的传输功率灵敏度; $S_{i,j,s2}$ 为 VSC 控制策略改变后节点 i 的节点注入功率对节点 j 的电压灵敏度。

在步骤 7 中, VSC 功率、线路功率和节点电压可以表示为:

$$P_x = P_{x,ini} + \Delta P_x \quad (15)$$

$$P_l = P_{l,ini} + \Delta P_l \quad (16)$$

$$U_j = U_{j,ini} + \Delta U_j \quad (17)$$

2.3 多个换流器过载情形

在步骤 7 中, 当式(15)计算的节点 y 处 VSC 的功率大于其容量时, 表示多个 VSC 过载。在这种情况下, 节点 y 处 VSC 的功率应表示为:

$$P_{y,ini} + \alpha \sum_{i=1}^h W_{i,y} \Delta P_i + \beta \sum_{i=1, i \neq x}^h W_{i,y} \Delta P_i = P_{y,max} \quad (18)$$

式中: $P_{y,ini}$ 、 $P_{y,max}$ 分别为位于节点 y 处 VSC 的初始功率和容量; β 为位于节点 y 的 VSC 控制策略调整前的功率变化比例; $W_{i,y}$ 为节点 i 处功率变化对节点 y 处 VSC 功率的灵敏度。

节点电压可以表示为:

$$U_j = U_{j,ini} + \alpha \sum_{i=1}^h S_{i,j} \Delta P_i + \beta \sum_{i=1, i \neq x}^h S_{i,j,s2} \Delta P_i + (1 - \alpha - \beta) \sum_{i=1, i \neq x, i \neq y}^h S_{i,j,s3} \Delta P_i \quad (19)$$

式中 $S_{i,j,s3}$ 为节点 y 处 VSC 控制策略变化后节点 i 处注入功率对节点 j 的电压灵敏度。

在步骤 4 的第一次计算中, 当多个 VSC 超出容量限制时, 根据式(13)计算每个过载 VSC 的功率变化比例 α , 选取 α 最小的 VSC 作为第一个控制策略调整的 VSC。

3 算例分析

3.1 算例 1

以图 6 所示典型双端直流配电系统为例进行仿真分析, 系统额定电压为 ± 10 kV。VSC1 和 VSC2 容量分别为 5 MW 和 2 MW, 运行参考功率分别设置为 4 MW 和 2 MW, 下垂系数均设置为 0.1 kV/MW, 线路电阻为 0.341 7 Ω /km。线路长度、负荷和光伏功率如图 6 所示。

由于本文研究对象为直流配电系统的稳态潮

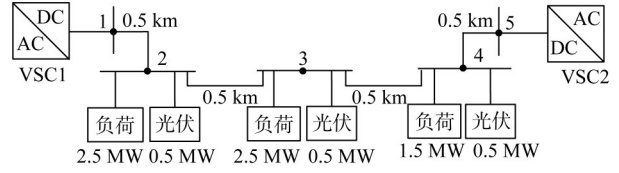


图 6 两端直流配电系统测试算例

Fig. 6 Test case of two-terminal DCDN

流, 因此采用潮流计算、传统的线性潮流计算与所提出的分段线性潮流算法进行对比。潮流计算采用文献[28]中的方法, 该方法能计算得到 VSC 不同控制方式下准确的稳态潮流参数。线性潮流计算采用文献[27]中的方法。设置负载功率和 PV 输出功率增加 20%, 计算得到的 VSC 功率结果如表 2 所示。传统的线性潮流算法获得的 VSC 功率最大误差为 8.9%, 而所提出的分段线性潮流算法的 VSC 功率最大误差为 0.08%, 远远小于传统的线性潮流算法。不同算法得到的电压结果如图 7 所示。线性潮流计算和分段线性潮流计算的最大电压误差分别为 0.25% 和 0.16%, 结果表明所提分段线性潮流计算方法具有更高的精度。

表 2 算例 1 中 VSC 功率计算结果

Tab. 2 Calculation results of VSC power in case 1

计算方法	VSC1		VSC2	
	功率/MW	误差/%	功率/MW	误差/%
PFC	4.040		2.000	
LPF ^[22]	3.822	5.40	2.178	8.90
PLPF	第一次计算		2.178	
	第二次计算	0.08	2.000	0

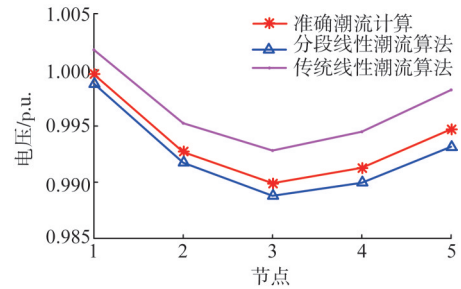


图 7 算例 1 中节点电压计算结果

Fig. 7 Calculation results of nodal voltages in case 1

所提出分段线性潮流算法和文献[26]中的二分法的计算精度和时间的比较如表 3 所示。所提算法计算的各阶段功率变化与文献[26]相同, 这是由于式(6)中的功率灵敏度矩阵 $\mathbf{W}$ 在两个模型中相同, 因此不同算法的收敛精度相同。在计算时间上, 在

所提出分段线性潮流算法中, 各阶段功率变化根据 VSC 功率平衡直接计算得出, 因此其计算时间小于二分法, 所提分段线性潮流算法具有良好的计算速度。

表 3 二分法算法与分段线性潮流算法对比

Tab. 3 Comparison of bisection algorithm and PLPF algorithm

算法	阶段 1 中功率变化的比例	迭代次数	计算时间/s
所提方法	0.586	2	0.028
二分法	0.586	13	0.051

3.2 算例 2

在算例 1 的基础上改造设计三端直流配电系统算例, 以分析多个 VSC 过载的情形, 系统如图 8 所示, 额定电压为 ± 10 kV, 线路电阻为 $0.341\ 7\ \Omega/\text{km}$ 。线路长度、负荷和光伏功率如图 8 所示。VSC 的参数如表 4 所示。

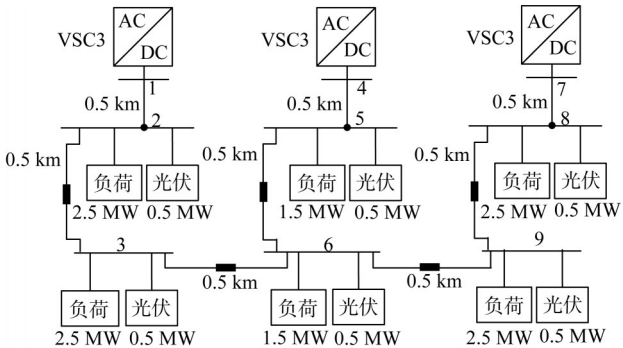


图 8 三终端 DCDN 示意图
Fig. 8 Diagram of a three-terminal DCDN

表 4 VSC 参数

Tab. 4 VSC parameters

VSC	下垂系数/(kV·MW ⁻¹)	参考功率/MW	VSC 容量/MW
VSC1	0.1	4	4.5
VSC2	0.1	2	2.5
VSC3	0.1	4	7.0

将负载功率和 PV 输出功率增加 40 %, 分析多个 VSC 过载的情况。VSC 功率计算结果如表 5 所示。VSC2 在第一轮计算中达到容量限制, VSC1 在第二轮计算中达到容量限制。经过 3 次分段线性潮流计算获得系统潮流数据, 结果表明所提出的分段线性潮流计算的最大 VSC 功率误差为 0.53 %, 远小于线性潮流计算的 25.3 %。不同算法得到的电压结果如图 9 所示, 分段线性潮流计算和线性潮流计算的最大电压误差分别为 0.21 % 和 2.13 %。仿

真结果表明, 针对 VSC 过载情形提出的分段线性潮流计算方法具有良好的准确性。

表 5 算例 2 中 VSC 功率计算结果

Tab. 5 Calculation results of VSC power in case 2

算法	VSC1		VSC2		VSC3	
	功率 /MW	误差 /%	功率 /MW	误差 /%	功率 /MW	误差 /%
PFC	5.000		3.000		4.619	
LPF	5.490	11.3	3.709	25.3	5.466	9.80
第一次计算	4.948		3.246		4.949	
PLPF 第二次计算	5.320		2.500		5.320	
第三次计算	4.500	0	3.000	0	6.117	0.53

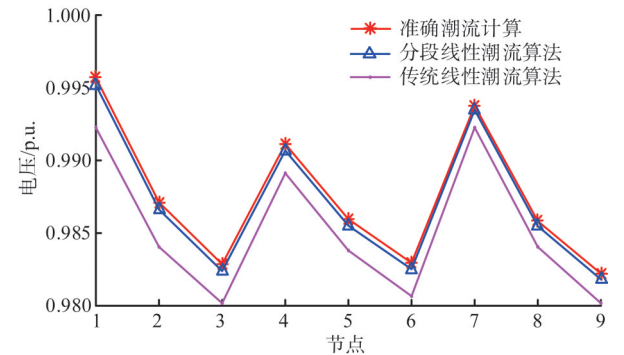


图 9 算例 2 中节点电压的计算结果
Fig. 9 Calculation results of nodal voltages in case 2

算例 2 中所提出的分段线性潮流算法与二分法的对比结果比较如表 7 所示。可知, 所提出的分段线性潮流算法与二分法相比, 在得到相同计算结果的同时, 所需要的迭代次数和计算时间更少。

表 7 二分法算法与分段线性潮流算法对比

Tab. 7 Comparison of bisection algorithm and PLPF algorithm

算法	阶段 1 功率变化比例	阶段 2 功率变化比例	迭代次数	计算时间/s
所提方法	0.238 2	0.226 2	3	0.503
二分法	0.621 1	0.358 8	21	0.113

4 结语

本文提出了一种考虑 VSC 容量约束的直流配电网分段线性潮流计算方法, 以有效分析功率变化和 VSC 控制策略调整对稳态潮流参数的耦合影响。在所提出的分段线性潮流算法中, 根据 VSC 功率平衡关系, 直接计算得到 VSC 达到容量极限的临界点, 进而计算得到 VSC 控制策略调整前各节点的功率变

化量,再对VSC控制策略调整前后各个阶段进行线性潮流计算,最后利用叠加法得到稳态潮流参数。

仿真结果表明,所提出的分段线性潮流算法在多个VSC过载时仍具有较高的准确性;与二分算法相比,所提出的分段线性潮流算法计算速度更快、模型更加简洁,具有良好的工程应用价值。

参考文献

- [1] 邹常跃,韦峰晖,冯俊杰,等.柔性直流输电发展现状及应用前景[J].南方电网技术,2022,16(3):1-7.
ZOU Changyue, WEI Ronghui, FENG Junjie, et al. Development status and application prospect of VSC-HVDC [J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(3): 1-7.
- [2] GOMIS-BELLMUNT O, SAU-BASSOLS J, PRIETO-ARAUJO E, et al. Flexible converters for meshed HVDC grids: from flexible AC transmission systems (FACTS) to flexible DC grids [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(1): 2-15.
- [3] 冯俊杰,辛清明,赵晓斌,等.大规模新能源超远距离送出的柔性直流系统集成设计方案[J].南方电网技术,2024,18(3):34-44.
FENG Junjie, XIN Qingming, ZHAO Xiaobin, et al. Integrated design scheme of VSC-HVDC system for large-scale renewable energy ultra-long-distance transmission [J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(3): 34-44.
- [4] 沈舒仪,王国腾,但扬清,等.频率偏差与电压刚度约束下多馈入直流优化调度方法[J].中国电力,2025,58(3):132-141.
SHEN Shuyi, WANG Guoteng, DAN Yangqing, et al. Optimal scheduling method for multi-infeed receiving-end power grids under frequency deviation and voltage stiffness constraints [J]. Electric Power, 2025, 58(3): 132-141.
- [5] LI X, LI Z, ZHAO B, et al. HVDC reactor reduction method based on virtual reactor fault current limiting control of MMC [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(12): 9991-10000.
- [6] 赵晓龙,陈卓,田霄,等.高压直流输电系统抑制连续换相失败的策略研究[J].电测与仪表,2022,59(4):185-190.
ZHAO Xiaolong, CHEN Zhuo, TIAN Xiao, et al. Research the strategy of mitigate consecutive commutation failure for HVDC transmission system [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(4): 185-190.
- [7] TANG G, HE Z, PANG H, et al. Basic topology and key devices of the five-terminal DC grid [J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2015, 1(2): 22-35.
- [8] YANG R, SHI G, CAI X, et al. Autonomous synchronizing and frequency response control of multi-terminal DC systems with wind farm integration [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(4): 2504-2514.
- [9] 熊雄,季宇,李蕊,等.直流配用电系统关键技术及应用示范综述[J].中国电机工程学报,2018,38(23):6802-6813,7115.
XIONG Xiong, JI Yu, LI Rui, et al. An overview of key technology and demonstration application of DC distribution and consumption system [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(23): 6802-6813, 7115.
- [10] 曾嵘,赵宇明,赵彪,等.直流配用电关键技术研究与应用展望[J].中国电机工程学报,2018,38(23):6791-6801,7114.
ZENG Rong, ZHAO Yuming, ZHAO Biao, et al. A prospective look on research and application of DC power distribution technology [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(23): 6791-6801, 7114.
- [11] 赵彪,赵宇明,王振,等.基于柔性中压直流配电的能源互联网系统[J].中国电机工程学报,2015,35(19):4843-4851.
ZHAO Biao, ZHAO Yuming, WANG Yizhen, et al. Energy Internet based on flexible medium-voltage DC distribution [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(19): 4843-4851.
- [12] ZHANG S, FANG Y, ZHANG H, et al. Maximum hosting capacity of photovoltaic generation in SOP-based power distribution network integrated with electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(11): 8213-8224.
- [13] 赵学深,彭克,张新慧,等.多端柔性直流配电系统主从控制模式下的稳定性与优化控制[J].电力自动化设备,2019,39(2):14-20.
ZHAO Xueshen, PENG Ke, ZHANG Xinhui, et al. Stability and optimal control of multi-terminal flexible DC distribution system under master-slave control mode [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(2): 14-20.
- [14] 解大,喻松涛,陈爱康,等.基于下垂特性调节的直流配电网稳态分析[J].中国电机工程学报,2018,38(12):3516-3528,11.
XIE Da, YU Songtao, CHEN Aikang, et al. Steady-state analysis for the DC distribution network with droop-control [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(12): 3516-3528, 11.
- [15] 赵学深,彭克,张新慧,等.多端柔性直流配电系统下垂控制动态特性分析[J].电力系统自动化,2019,43(2):89-96.
ZHAO Xueshen, PENG Ke, ZHANG Xinhui, et al. Analysis on dynamic performance of droop control for multi-terminal VSC based DC distribution system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(2): 89-96.
- [16] 刘团结,韦延方,王鹏,等.适用于柔性直流系统潮流计算的高阶牛顿法效率分析[J].高电压技术,2020,46(11):3837-3848.
LIU Tuanjie, WEI Yanfang, WANG Peng, et al. Efficiency analysis of high-order newton method for flexible DC power flow calculation [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(11): 3837-3848.
- [17] 赵学深,彭克,张新慧,等.多端柔性直流配电系统下垂控制动态特性分析[J].电力系统自动化,2019,43(2):89-96.
ZHAO Xueshen, PENG Ke, ZHANG Xinhui, et al. Analysis on dynamic performance of droop control for multi-terminal VSC based DC distribution system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(2): 89-96.
- [18] 张松涛,张东霞,黄彦浩,等.基于改进直流潮流算法的潮流计算收敛自动调整方法研究[J].电网技术,2021,45(1):86-97.
ZHANG Songtao, ZHANG Dongxia, HUANG Yanhao, et al. Research on automatic power flow convergence adjustment method based on modified DC power flow algorithm [J]. Power System Technology, 2021, 45(1): 86-97.
- [19] ZENG L, CHIANG H D. Toward an online minimum number

- of controls for relieving overloads [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(2): 1882 – 1890.
- [20] GUERRERO J M, VASQUEZ J C, MATAS J, et al. Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids—a general approach toward standardization [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(1): 158 – 172.
- [21] HAILESELASSIE T M, UHLEN K. Impact of DC line voltage drops on power flow of MTDC using droop control [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(3): 1441 – 1449.
- [22] 刘琪,王守相,赵倩宇,等.基于信息间隙决策理论的下垂控制直流配电网运行参考点优化方法[J].电网技术,2022,46(11): 4381 – 4391.
- LIU Qi, WANG Shouxiang, ZHAO Qianyu, et al. Operation reference point optimization of droop-controlled DC distribution networks based on information gap decision theory [J]. Power System Technology, 2022, 46(11): 4381 – 4391.
- [23] WANG H, ZHOU N, ZHANG Y, et al. Linearized power flow calculation of bipolar DC distribution network with multiple flexible equipment [J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2024 (155): 109568.1–109568.18.
- [24] WANG Y, WEN W, WANG C, et al. Adaptive voltage droop method of multiterminal VSC-HVDC systems for DC voltage deviation and power sharing [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(1): 169 – 176.
- [25] BEERTEN J, BELMANS R. Analysis of power sharing and voltage deviations in droop-controlled DC grids [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 4588 – 4597.
- [26] XIAO L, XU Z, AN T, et al. Improved analytical model for the study of steady state performance of droop-controlled VSC-MTDC systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(3): 2083 – 2093.
- [27] YUAN Z, WANG Y, YI Y, et al. Fast linear power flow algorithm for the study of steady-state performance of DC grid [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(6): 4240 – 4248.
- [28] 吴红斌,杨超,陈煜,等.基于电压源型换流器的多端直流配电网潮流计算[J].电力系统自动化,2018,42(11): 79 – 85.
- WU Hongbin, YANG Chao, CHEN Yu, et al. Power flow calculation of multi-terminal DC distribution network based on voltage source converter [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(11): 79 – 85.

收稿日期:2024-01-05;网络首发日期:2024-06-27

作者简介:

黄学劲(1987),男,高级工程师,硕士,研究方向为智能配电网规划,新能源并网接入,598066581@qq.com;

喻松涛(1992),男,工程师,硕士,研究方向为柔性直流配电技术、电力电子技术,yust@csg.cn;

王之谦(2000),男,硕士研究生,研究方向为柔性直流输电系统控制保护技术,zhiqian_wang@tju.edu.cn。

(上接第43页 Continued from Page 43)

- YE Ruili, GUO Zhizhong, LIU Ruiye. Reliable power output based on confidence interval estimation and optimal ESS configuration of wind farm [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(5): 85 – 91.
- [19] 赵书强,汤善发.基于改进层次分析法、CRITIC法与逼近理想解排序法的输电网规划方案综合评价[J].电力自动化设备,2019,39(3): 143 – 148.
- ZHAO Shuqiang, TANG Shanfa. Comprehensive evaluation of transmission network planning scheme based on improved analytic hierarchy process, CRITIC method and TOPSIS [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3): 143 – 148.
- [20] 张海瑞,韩冬,刘玉娇.基于反熵权法的智能电网评价[J].电力系统保护与控制,2012,40(11): 24 – 29.
- ZHANG Hairui, HAN Dong, LIU Yujiao. Smart grid evaluation based on Anti-Entropy weight method [J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(11): 24 – 29.

- [21] 王伟胜,冯双磊,王钊.风电功率预测[M].北京:科学出版社,2020.

收稿日期:2024-01-17;网络首发日期:2024-06-25

作者简介:

屈伯阳(1991),男,通信作者,博士研究生,研究方向为新能源电力系统优化运行,1255046328@qq.com;

李宏伟(1989),男,讲师,硕士,从事电子技术应用、无线通信、农业信息化及电气化领域科研工作,2017500050@syau.edu.cn;

付立思(1964),男,教授,博士,研究方向为新能源电力系统优化运行、电力电子化电力系统的稳定与控制、电能质量分析与控制及储能系统应用技术,fulisi@syau.edu.cn。