

DOI: 10.11985/2020.04.009

基于保留非线性算法的直流配电网潮流计算*

刁守斌¹ 于 涛² 王 Jianjian³ 安 鹏⁴ 李辛鹏¹

- (1. 国网济南市商河县供电公司 济南 251600;
2. 济南市规划设计研究院 济南 250101;
3. 山东大学电气工程学院 济南 250061;
4. 国网山东省电力公司 济南 250001)

摘要: 随着直流负荷、直流电源的增加, 直流供电系统将成为未来配电系统的发展方向。为计算直流配电网的潮流分布, 分析了电压源换流器的稳态模型及控制方式, 建立了 DC-DC 变换器的统一稳态非理想模型, 并在此基础上提出了基于保留非线性算法的直流配电网潮流计算。为解决保留非线性算法对初值要求高的问题, 提出了一种利用线性潮流算法的解作为初值的方法, 大大减少了迭代次数, 所提算法在保证计算精度的同时提高了潮流计算速度。以 30 节点直流配电网模型为算例进行分析, 并与牛顿拉夫逊算法计算结果对比, 验证了保留非线性算法在计算速度上的优势。

关键词: 保留非线性; 直流配电网; 潮流计算; DC-DC 变换器; 稳态非理想模型

中图分类号: TM744

Power Flow Calculation of DC Distribution Network Based on the Retaining-nonlinearity Algorithm

DIAO Shoubin¹ YU Tao² WANG Jianjian³ AN Peng⁴ LI Xinpeng¹

- (1. State Grid Jinan Shanghe Power Supply Company, Jinan 251600;
2. Jinan Planning and Design Institute, Jinan 250101;
3. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061;
4. State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250001)

Abstract: With the increase of DC load and DC power source, DC power supply system will become the future development direction of distribution system. In order to calculate the power flow distribution of the DC distribution network, the steady-state model and control method of the voltage-sourced converter are analyzed, and the unified steady-state non-ideal model of the DC-DC converter is established. Based on the above analysis, a power flow calculation method of DC distribution network based on retaining-nonlinearity algorithm is proposed. To solve the problem that the retaining-nonlinearity algorithm requires high initial value, a method using the solution of linear power flow algorithm as the initial value is proposed, which greatly reduced the number of iterations. The proposed algorithm improved the speed of power flow calculation while ensuring accuracy. Taking the 30-node DC distribution network model as an example for analysis and the results are compared with the solution of Newton-Raphson algorithm, the advantage of retaining-nonlinearity algorithm in the calculation speed is verified.

Key words: Retaining-nonlinearity; DC distribution network; power flow calculation; DC-DC converter; steady-state non-ideal model

1 引言

随着分布式电源的接入以及直流负荷的增加,

传统交流配电网在电能质量^[1-2]、供电能力等方面越来越难以满足用户需求。直流配电网由于具有更高的供电可靠性^[3]、更好的经济性^[4]、更高的供电质量等众多优点, 得到了业界的广泛关注。同时因为其众多优点, 很多学者都认为直流配电网建设或将成为未来配电网发展的一个重要方向^[5-7]。

* 山东省重点研发计划资助项目(2019GGX103008)。20200527 收到初稿, 20200805 收到修改稿

潮流计算作为最基本的电气运算,对电力系统的分析具有重要作用。由于直流配电网中不含无功,网络中又包含多种电力电子设备,如电压源型换流器(Voltage-sourced convert, VSC)和 DC-DC 变换器等,使得其潮流计算与交流电网的潮流计算有所不同。针对直流电网的特点,目前有关其潮流计算的研究大多集中在 VSC 下垂控制方式下的潮流计算^[8-9]研究,或者考虑直流电网的不同控制策略^[10]、多变流器不同下垂控制特性并联运行^[11]等情况。在 DC-DC 变换器的建模方面,DC-DC 升压变换器数学模型^[12]、降压-升压 DC-DC 变换器数学模型^[13]、Buck 及 Boost 变换器的非理想稳态模型^[14]以及 DC-DC 变换器统一非理想稳态模型^[15]都已经有很成熟的研究。但考虑 DC-DC 变换器详细模型的直流电网潮流计算方法还很少。

目前直流电网的潮流算法仍以牛顿拉夫逊法(Newton-Raphson, NR)为主,但是基于节点阻抗矩阵的高斯-赛德尔法^[16](Gauss-Seidel, GS)、基于节点电流关系的 NR 法^[17]及改进前推回代算法^[18]也各有优点,应用广泛。其中基于节点阻抗矩阵的 GS 法和基于节点电流关系的 NR 法,具有收敛性好,对初值选取不敏感的特点。而改进前推回代算法则能够有效地解决环网和 VSC 下垂控制方式带来的影响。除此之外,适用于直流电网的 PQ 分解法^[19-20]以及线性潮流算法^[21-22]也相继被提出,这些算法均具有较快的计算速度。但是这些算法都未考虑到 DC-DC 变换器给潮流计算带来的影响,有的算法在提高速度的同时降低了计算的精度。保留非线性算法是一种快速求解潮流的方法,与 NR 法相比,速度更快,收敛可靠性更高。一些文献通过对保留非线性算法进行改进^[23-24],进一步提高了算法的收敛速度。将保留非线性法的原理应用于 PQ 分解法^[25],则能够使算法兼具 P-Q 解耦和保留非线性的优点。但是这些都只能用于交流电网,可应用于直流配电网的保留非线性算法还未有人研究。考虑到 DC-DC 变换器对潮流计算的影响,为了保证对多电压等级、大规模直流配电网进行潮流计算时,计算速度和计算精度能同时兼备,本文提出了一种基于保留非线性算法的直流配电网潮流计算方法。

本文分析了 VSC 的稳态模型及控制方式,建立了 DC-DC 变换器的统一非理想稳态模型,在此基础上提出了基于保留非线性算法的直流配电网潮流计算方法;通过与 NR 法比较,证明了所提算法在计算速度上的优势;分析了电压初值对保留非线性算法收敛性的影响,提出了一种利用线性潮流算法

确定初值的方法,大大减少了潮流计算时的迭代次数。

2 变换器稳态数学模型

2.1 VSC 稳态数学模型及控制方式

由于 VSC 能够提供更高的传输效率,而且控制方式也灵活多变,所以在直流配电网中得到了广泛应用。VSC 换流站的结构示意图如图 1 所示。 Z_c 为换流电抗器的阻抗, P_s 、 Q_s 、 U_s 和 δ_s 分别表示交流母线处的有功功率、无功功率、电压幅值和相角。 P_c 、 Q_c 、 U_c 和 δ_c 分别表示 VSC 交流出口处的有功功率、无功功率、电压幅值和相角。 P_{dc} 、 U_{dc} 则分别表示 VSC 直流侧的有功功率和电压。

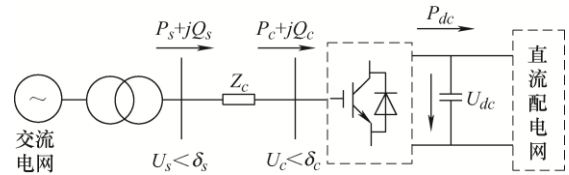


图1 VSC 换流站的结构示意图

以图 1 中所标箭头方向作为正方向,则根据换流器两端输入输出功率平衡可得

$$\begin{cases} P_c = P_{dc} + P_{loss} \\ P_{dc} = U_{dc} I_{dc} \end{cases} \quad (1)$$

式中, I_{dc} 为换流器直流侧的电流; P_{loss} 为换流器运行时的有功损耗^[18]

$$P_{loss} = aI_c^2 + bI_c + c \quad (2)$$

$$I_c = \frac{\sqrt{P_c^2 + Q_c^2}}{\sqrt{3}U_c} \quad (3)$$

式中, I_c 为 VSC 交流侧电流幅值; a 为与 I_c^2 成正比的损耗系数; b 为与 I_c 成正比的损耗系数; c 为固定损耗。

VSC 可分别对有功和无功变量进行独立控制,其中对直流侧电网有影响的控制方式包括定直流电压控制、定有功功率控制和电压下垂控制^[16],如图 2 所示。式(4)为功率-电压下垂曲线表达式,其中 ρ 表示换流器的下垂控制律,当 $\rho = \infty$ 时,该式也可表示定有功功率控制。根据给定变量的不同,直流系统中的节点可分为 P 节点、V 节点和 D 节点^[26] 3 类。一般当 VSC 采用电压下垂控制方式时,与之相连的节点类型为 D 节点。

$$P_{dc} = P_{dc}^* - \frac{U_{dc} - U_{dc}^*}{\rho} \quad (4)$$

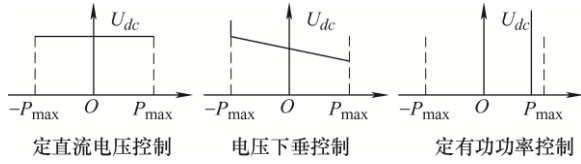


图2 VSC不同控制方式的控制原理

2.2 DC-DC 变换器稳态数学模型

交流配电网一般存在多个电压等级，不同电压等级之间通过交流变压器互联以实现功率传输和电压变换。同样，在直流配电网中也存在多个电压等级，区别是实现不同电压等级之间功率传输和电压变换的设备不再是交流变压器，而是 DC-DC 变换器。

DC-DC 变换器作为直流配电系统的重要设备，建立其稳态模型是进行潮流计算的基础。但是 DC-DC 变换器的类型众多，一种类型建立一种模型，进行潮流计算很不方便。所以为了提高潮流计算的精度同时减少不同变换器类型带来的麻烦，建立一个 DC-DC 变换器统一的非理想稳态模型十分必要。根据 DC-DC 变换器在稳态情况下的运行特点，本文建立了变换器 CCM 模式下的非理想稳态模型^[15]。

在用于连接两个不同电压等级配电网时，常用的 DC-DC 变换器是全桥电路，所以本文以单相全桥电路的 DC-DC 变换器为例进行分析。首先，需要在考虑损耗的情况下建立变换器的等效电路。变换器中包含多种开关器件和储能器件，在考虑损耗的情况下，其等效模型如图 3 所示。

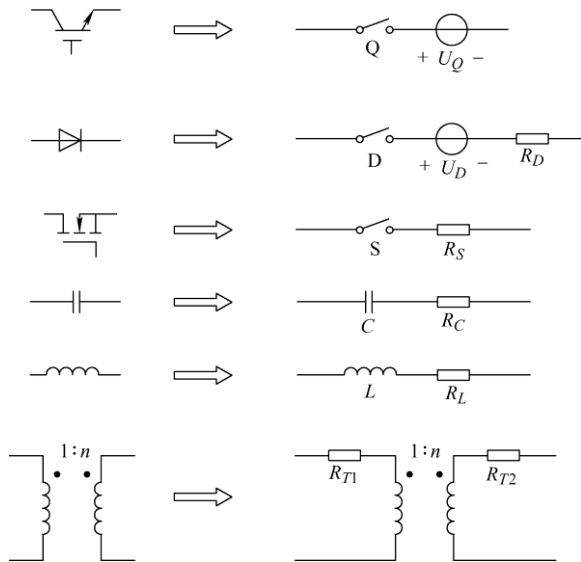


图3 变换器中各元件的等效模型

图中， U_Q 为 IGBT 的饱和压降； R_S 为 MOSFET 的导通电阻； U_D 为二极管的正向导通压降， R_D 为二极管的导通电阻； L 和 C 分别为理想线圈及理想

电容， R_L 和 R_C 分别为对应电感电阻及电容电阻； R_{T1} 和 R_{T2} 分别为变压器原副边绕组的电阻； n 为变压器变比。

图 4 为单相全桥 DC-DC 变换器的原理图，假设所有开关管及二极管都完全相同，且忽略开关管输出电容、二极管电容及变压器的分布电容。利用图 3 中各器件的等效模型代替相应的器件，即可得到考虑损耗的单相全桥 DC-DC 变换器的等效电路。

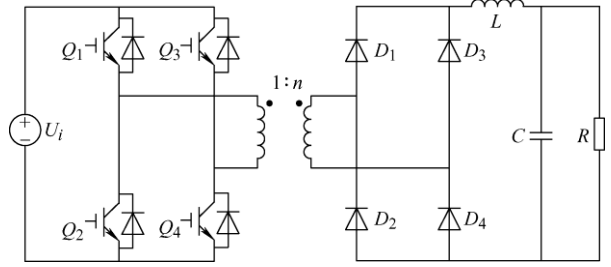


图4 单相全桥 DC-DC 变换器的原理图

假设变换器的周期为 T_S ， D 为占空比。则根据变换器等效电路可知，在 0 至 DT_S 时间内，变换器负载侧电感电压和电容电流的瞬时值可写为^[15]

$$\begin{cases} u_L(t) = n(U_i - n i_L(t) R_{T1} - 2U_Q) - 2U_D - u_0(t) - i_L(t)(2R_D + R_L + R_{T2}) \\ i_C(t) = i_L(t) - \frac{u_0(t)}{R} \end{cases} \quad (5)$$

式中， $u_L(t)$ 表示负载侧电感电压的瞬时值； $i_L(t)$ 表示负载侧电感电流的瞬时值； $i_C(t)$ 表示负载侧电容电流的瞬时值； $u_0(t)$ 表示负载 R 两端的瞬时电压。

同理可得，在 DT_S 至 $T_S/2$ 时间内的电感电压和电容电流的瞬时值为^[15]

$$\begin{cases} u_L(t) = -i_L(t) \left(R_D + R_L + \frac{R_{T2}}{2} \right) - 2U_D - u_0(t) \\ i_C(t) = i_L(t) - \frac{u_0(t)}{R} \end{cases} \quad (6)$$

在后半周期，变换器的工作原理与前半周期类似。由于电感及电容在一个周期内吸收和释放的功率相等，若忽略电感电流及负载电压中的高频纹波分量，并利用其平均值 I_L 和 U_0 代替瞬时值可得^[15]

$$\begin{cases} i_L(t) \approx I_L \\ u_0(t) \approx U_0 \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} 2nDU_i - U_0 - 2U_D - 4nDU_Q - I_L R_E = 0 \\ I_L = \frac{U_0}{R} \end{cases} \quad (8)$$

其中，

$$R_E = 2n^2 D R_{T1} + R_L + D R_{T2} + \frac{R_{T2}}{2} + 2D R_D + R_D \quad (9)$$

变换器输入电流的平均值为

$$I_i = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} i_i(t) dt = 2nDI_L \quad (10)$$

根据上述等式可得在 CCM 模式下的单相全桥变换器稳态等效模型如图 5 所示。

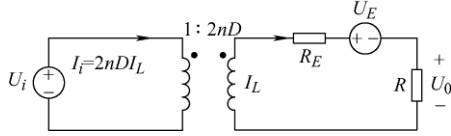


图5 CCM模式下的单相全桥变换器稳态等效模型

其中，

$$U_E = 2U_D + 4nDU_Q \quad (11)$$

对于 DC-DC 变换器，其单个开关器件的耐压水平有限，而随着耐压水平的提高，其成本会成倍增加。考虑到高压场合应用下变换器的经济性，本文采用了变换器子模块的串并联技术。这种方式具有简单、易于实现的特点，而且技术也较为成熟，应用广泛。在直流配电网中压至低压的变换场合，输入侧电压较大，输出侧电流较大，采用输入串联输出并联(Input-series output-parallel, ISOP)的方式较为合适。其拓扑结构如图 6 所示。

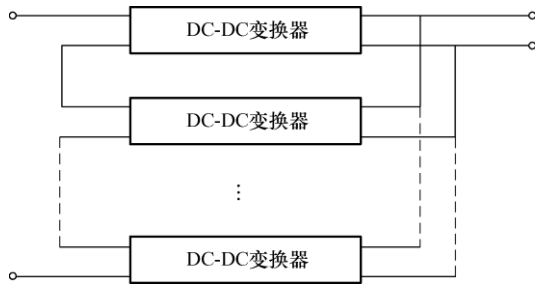


图6 输入串联输出并联(ISOP)拓扑结构

同理，按照与建立单相全桥变换器稳态模型相同的方法也可建立其他各类型的 DC-DC 变换器在 CCM 模式下的非理想稳态模型。若同时考虑变换器采用 ISOP 拓扑结构，则 DC-DC 变换器的统一稳态非理想模型如图 7 所示。 N 为 ISOP 拓扑结构中的变换器子模块个数； U_I 、 U_0 分别为变换器的输入、输出电压。双相全桥变换器与单相全桥变换器拥有相同的稳态模型，其余各拓扑结构下非理性模型的各项参数如表 1~2 所示。

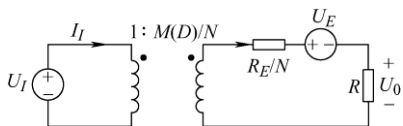


图7 ISOP 拓扑下的 DC-DC 变换器统一稳态模型

表1 变换器不同拓扑结构下的各项参数

名称	$M(D)$	U_E
Buck 变换器	D	$(1-D)U_D$
Boost 变换器	$\frac{1}{1-D}$	U_D
Buck-Boost 变换器	$-\frac{D}{1-D}$	U_D
反激型变换器	$\frac{nD}{1-D}$	U_D
正激型变换器	nD	U_D

表2 变换器不同拓扑结构下的 R_E

名称	R_E
Buck 变换器	$DR_S + R_L + (1-D)R_D$
Boost 变换器	$\frac{DR_S + R_L + (1-D)R_D}{(1-D)^2}$
Buck-Boost 变换器	$\frac{DR_S + R_L + (1-D)R_D}{(1-D)^2}$
反激型变换器	$\frac{n^2DR_S + n^2R_m + (1-D)R_D}{(1-D)^2}$
正激型变换器	$n^2DR_S + n^2DR_{T1} + DR_{T2} + R_L + R_D$

若将 DC-DC 变换器进行 π 等值变换，可得其等值电路如图 8 所示。相应的自导纳和互导纳为

$$\begin{cases} y_{12} = \frac{M(D)}{R_E} \\ y_{10} = \frac{M(D)^2 - M(D)N}{NR_E} \\ y_{20} = \frac{N - M(D)}{R_E} \end{cases} \quad (12)$$

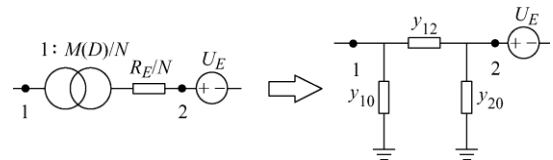


图8 DC-DC 变换器的 π 等值电路

3 保留非线性潮流算法

3.1 保留非线性算法

NR 法的原理是利用逐次线性化的处理方式求解潮流方程，保留非线性算法则是在这个过程中采用更加精确的模型来求解，这样能够进一步提高潮流计算的速度以及收敛性能^[27]。采用更精确模型可以使得雅克比矩阵保持不变，大大提高潮流计算的速度。

设直流配电网中有 n 个节点，前 m 个节点为 P 节点或 D 节点，其余节点为 V 节点，则节点注入电流为

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} U_j \quad (13)$$

式中, I_i 为节点 i 的节点注入电流; U_i 、 U_j 分别为节点 i 、 j 的节点电压; Y_{ij} 为节点 i 、 j 之间的互导纳; Y_{ii} 为节点 i 的自导纳。

对于含 DC-DC 变换器的支路, 从图 8 可以看出, 支路中除了电阻外还包含有一个电压降 U_E , 所以需要支路两端的节点注入电流值进行修正。假设 i 和 j 分别为变换器支路的首端节点和末端节点, 修正前首末端电流分别为 I_i' 和 I_j' , 修正后电流为 I_i 和 I_j , 则^[15]

$$\begin{cases} I_i = I_i' - y_{ij} U_E \\ I_j = I_j' + (y_{ij} + y_{j0}) U_E \end{cases} \quad (14)$$

由此可得系统的潮流方程为

$$P_i^* + \frac{U_i^*}{\rho_i} = P_i = U_i I_i + \frac{U_i}{\rho_i} \quad (15)$$

式中, 若节点为 P 节点, 则 $\rho_i = \infty$, 若节点为 D 节点, 则 ρ_i 为常数。从式(13)、(14)可以看出, 电流 I_i 是一个有关节点电压的一次代数方程。将式(13)、(14)代入式(15), 可知式(15)是一个有关节点电压的二次代数方程。对其进行泰勒展开可得

$$\begin{aligned} P_i(U) &= P_i(U^0) + \sum_{j=1}^n \frac{\partial P_i}{\partial U_j} \Big|_{U=U^0} \Delta U_j + \\ &\frac{1}{2!} \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \frac{\partial^2 P_i}{\partial U_j \partial U_k} \Big|_{U=U^0} \Delta U_j \Delta U_k \end{aligned} \quad (16)$$

式中, U 表示电压矢量, U^0 表示电压初值矢量。由于三阶及三阶以上的展开项均为零, 所以式(16)为一个没有截断误差的精确泰勒展开式。对于 P 节点和 D 节点, 对应的潮流方程写成矩阵形式

$$P^s = P(U^0) + J \Delta U + sP \quad (17)$$

式中, $P^s = [P_1^s, P_2^s, \dots, P_m^s]$, P_i^s 表示 i 节点给定有功功率, $P_i^s = P_i^* + U_i^* / \rho_i$ 。 $\Delta U = [\Delta U_1, \Delta U_2, \dots, \Delta U_m]$, $P(U^0) = [P_1(U^0), P_2(U^0), \dots, P_m(U^0)]$ 。 $sP = [sP_1, sP_2, \dots, sP_m]$, sP_i 表示相应的二阶展开项。 J 为雅克比矩阵, $J = \partial P / \partial U$ 。

由式(17)即可推导保留非线性算法的迭代公式如下

$$\Delta U^{k+1} = -J^{-1} [P(U^0) - P^* + sP^k] \quad (18)$$

$$U^{k+1} = U^0 + \Delta U^{k+1} \quad (19)$$

式中, k 表示迭代次数。 J 可按照 $U = U^0$ 获得, 如式

(20)所示

$$J = \begin{cases} U_i^0 Y_{ij} & i \neq j \\ U_i^0 Y_{ii} + I_i^0 + \frac{1}{\rho_i} & i = j \end{cases} \quad (20)$$

$P(U^0)$ 和 sP^k 可分别由式(21)、(22)推导获得。

$$P_i(U^0) = U_i^0 I_i^0 \quad (21)$$

$$sP_i^k = \Delta U_i^k \sum_{j=1}^n Y_{ij} \Delta U_j^k \quad (22)$$

保留非线性潮流算法收敛判据如式(23)所示

$$\max |\Delta U_i^{k+1} - \Delta U_i^k| < \varepsilon \quad (23)$$

式中, ε 为给定的收敛判据。

根据上述分析, 采用保留非线性潮流算法进行直流配电网潮流计算时的流程图如图 9 所示。

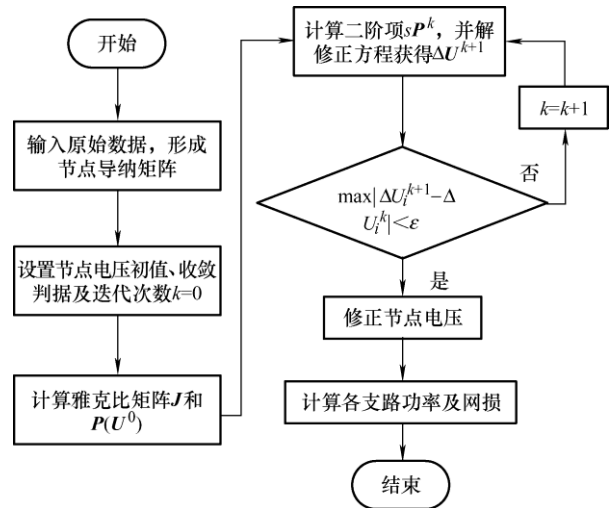


图 9 基于保留非线性算法的直流配电网潮流计算流程

3.2 初值计算

从上述保留非线性算法的原理可以看出, 雅克比矩阵只需要求得一次并在整个迭代过程中始终保持不变。这使得保留非线性算法与 NR 法相比达到收敛所需的迭代次数更多。但因为无需在每次迭代时都计算雅克比矩阵并进行三角分解, 大大减少了计算量, 所以总的计算速度比 NR 法提高很多。从式(20)可以看出, 保留非线性算法的雅克比矩阵是由电压初值求得, 因此电压初值的选择对保留非线性算法的收敛特性有着决定性的影响。若电压初值选取不当可能导致潮流计算时收敛速度变慢, 收敛所需迭代次数大大增加, 甚至可能导致算法无法收敛。为了避免初值选取不当可能对算法带来的不利影响, 可以利用线性潮流算法先求得一个电压初值,

然后利用此电压初值进行保留非线性算法计算。

根据式(15)可知当考虑 VSC 下垂控制方式及 DC-DC 变换器稳态模型时, 系统中 i 节点的节点注入电流为

$$I_i = \frac{P_i^*}{U_i} + \frac{U_i^*}{U_i \rho_i} - \frac{1}{\rho_i} \quad (24)$$

由于直流系统中各节点电压与额定电压之间相差不大, 假设以额定电压值 U_n 代替式(24)中等式右侧 U_i 可得^[22]

$$I_i = \frac{P_i^*}{U_n} + \frac{U_i^*}{U_n \rho_i} - \frac{1}{\rho_i} \quad (25)$$

式(25)为关于节点电压的一次代数方程, 可通过高斯消去法直接求解获得相应的解。若将此解作为最终的潮流解存在较大的误差, 但若将其作为保留非线性算法的电压初值, 则可以解决初值选取对算法收敛特性的影响, 大大减少迭代次数。

4 算例分析

为了验证所提潮流计算方法的正确性和可行性, 针对一 30 节点的直流配电网系统, 进行了编程验证。该系统是由 IEEE30 节点标准算例修改获得。如图 10 所示, 该直流配电系统共包含两个电压等级, 其中 1-8 节点和 28 节点电压等级为 10 kV, 其余节点电压等级为 1 kV。中压系统和低压系统之间通过 4 个单相全桥 DC-DC 变换器相连, 且均采用 ISOP 结构, 以提高变换器的耐压和耐流能力。变换器的各项参数如表 3 和表 4 所示。从图 10 可看出该

直流配电网在节点 1 处通过 VSC 与交流电网相连。同时系统中还包含有 4 个分布式电源, 分别通过 VSC 或 DC-DC 变换器向直流配电网传输能量。该直流配电系统中各节点的相关数据如表 5 和表 6 所示, 表 7 为各支路电阻数据。在进行潮流计算的过程中均采用标么值, 其中基准电压为额定电压, 基准功率为 10 MW。且本文所提潮流计算方法及 NR 法均是在 Matlab2018 中编程实现。计算系统的处理器为 Intel(R) Core(TM) i5-6300HQ, CPU 主频 2.3 GHz, 内存 4 GB。

表 3 DC-DC 变换器参数

R_D/Ω	R_L/Ω	U_D/V	U_Q/V	R_{T1}/Ω	R_{T2}/Ω	n
0.075	0.720	0.400	2.500	0.250	0.040	0.400

表 4 DC-DC 变换器设置

支路	控制方式	模块数 N
4-12	恒变比 $D=0.350$	3
6-9	恒变比 $D=0.367$	3
6-10	恒变比 $D=0.364$	3
28-27	恒变比 $D=0.370$	3

表 5 V 节点数据

节点号	负荷功率/p.u.	电压/p.u.
1	0	1.050
11	0	1.010
13	0	1.010

表 6 P 节点数据

节点	发电功率/p.u.	负荷功率/p.u.	节点	发电功率/p.u.	负荷功率/p.u.
2	0.8	0.217 0	18	0	0.003 2
3	0	0.024 0	19	0	0.009 5
4	0	0.076 0	20	0	0.002 2
5	0.5	0.942 0	21	0	0.017 5
6	0	0	22	0	0
7	0	0.228 0	23	0	0.003 2
8	0.2	0.300 0	24	0	0.008 7
9	0	0	25	0	0
10	0	0.005 8	26	0	0.003 5
12	0	0.011 2	27	0	0
14	0	0.006 2	28	0	0
15	0	0.008 2	29	0	0.002 4
16	0	0.003 5	30	0	0.010 6
17	0	0.009 0			

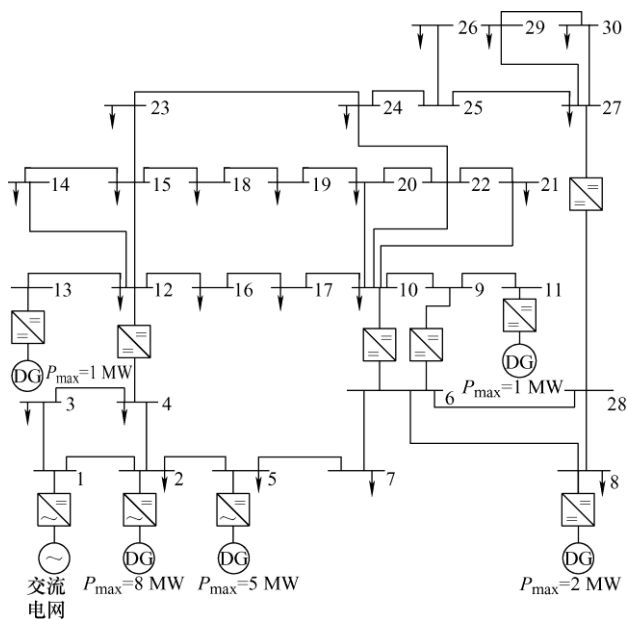


图 10 30 节点直流配电网测试系统

表 7 支路电阻数据

支路	电阻/p.u.	支路	电阻/p.u.
1-2	0.019 2	12-13	0.064 0
1-3	0.045 2	12-14	0.123 1
2-4	0.057 0	12-15	0.066 2
2-5	0.047 2	12-16	0.094 5
2-6	0.058 1	14-15	0.221 0
3-4	0.013 2	15-18	0.107 3
4-6	0.011 9	15-23	0.100 0
4-12	0	16-17	0.052 4
5-7	0.046 0	18-19	0.063 9
6-7	0.026 7	19-20	0.064 0
6-8	0.012 0	21-22	0.061 6
6-9	0	22-24	0.115 0
6-10	0	23-24	0.132 0
6-28	0.016 9	24-25	0.188 5
8-28	0.063 6	25-26	0.254 4
9-10	0.071 0	25-27	0.109 3
9-11	0.070 8	27-29	0.219 8
10-17	0.052 4	27-30	0.320 2
10-20	0.093 6	28-27	0
10-21	0.054 8	29-30	0.239 9
10-22	0.072 7		

在 Matlab 中分别编写基于 NR 法和基于保留非线性算法的潮流计算程序,并对上述 30 节点直流配电网系统进行潮流计算,计算结果如表 8 所示。其中 NR 法用 NR 表示,保留非线性算法用 RN 表示。从中可以看出,当收敛判据为 1×10^{-6} 时,基于保留非线性算法的直流配电网潮流计算结果与基于 NR 法的潮流计算结果之间的最大误差为 $2.892\ 44\times10^{-6}\%$,证明了本文所提方法的正确性和可行性。

此外,按照仅保留有功功率和线路电阻参数的原则将 IEEE69 节点和 118 节点^[28]交流配电网算例修改为直流配电网算例。在不同潮流算法下的潮流计算时间如表 9 所示。可以看出,对于相同的算例,保留非线性算法的计算速度比 NR 法要快。这是因为保留非线性算法的雅克比矩阵在迭代过程中能始终保持不变,大大减少了计算量。30 节点时因为网络规模较小,保留非线性算法的速度优势并不明显,其计算速度仅比 NR 法略快。但随着网络规模的增加,69 节点和 118 节点时,保留非线性算法的计算速度则是 NR 法的 3 倍以上。由此可知,与 NR 法相比,保留非线性算法在保证计算精度的情况下,其计算速度更快。且对于规模较大的直流配电网络,其速度优势也更加明显。

表 8 不同算法求得的节点电压

节点	NR 电压/p.u.	RN 电压/p.u.
1	1.050 000 00	1.050 000 00
2	1.047 703 41	1.047 703 38
3	1.042 522 51	1.042 522 48
4	1.040 642 69	1.040 642 67
5	1.029 352 94	1.029 352 92
6	1.038 208 94	1.038 208 92
7	1.031 221 23	1.031 221 21
8	1.037 186 36	1.037 186 33
9	1.006 975 99	1.006 975 99
10	1.004 067 35	1.004 067 35
11	1.010 000 00	1.010 000 00
12	1.005 662 02	1.005 662 02
13	1.010 000 00	1.010 000 00
14	1.004 609 64	1.004 609 64
15	1.004 084 23	1.004 084 23
16	1.004 510 04	1.004 510 04
17	1.004 053 85	1.004 053 85
18	1.003 294 08	1.003 294 08
19	1.003 027 33	1.003 027 33
20	1.003 366 33	1.003 366 33
21	1.003 167 86	1.003 167 86
22	1.003 231 35	1.003 231 35
23	1.003 016 17	1.003 016 17
24	1.002 027 47	1.002 027 47
25	1.000 278 89	1.000 278 88
26	0.999 387 94	0.999 387 94
27	0.999 647 77	0.999 647 77
28	1.037 898 65	1.037 898 63
29	0.998 309 24	0.998 309 24
30	0.997 425 05	0.997 425 04

表 9 不同算法的潮流计算时间

算例	30 节点	69 节点	118 节点
NR 时间/s	0.000 904	0.004 520	0.008 989
RN 时间/s	0.000 650	0.001 458	0.002 700

为了分析节点电压初值选取对保留非线性算法收敛性的影响,对直流配电网不同拓扑结构下,选取不同电压初值时的潮流进行了计算。其收敛所需迭代次数如表 10 所示。从表 10 中可以看出,当电压初值选取不同时,保留非线性算法收敛所需迭代次数也不同。而且电压初值的微小变化即可引起迭代次数的成倍增加。由此可见,电压初值的选取对

保留非线性算法的收敛特性有着较大影响。

表 10 不同电压初值对保留非线性算法的影响

电压初值/p.u.	迭代次数		
	30 节点	69 节点	118 节点
1.20	10	9	9
1.00	6	6	6
0.95	9	9	9
0.90	14	14	14

若利用线性潮流算法先进行电压初值计算,再利用保留非线性算法进行求解,其在不同拓扑结构下的潮流计算结果如表 11 所示,其中该方法用 LPF-RN 表示。与表 10 中结果进行对比可以看出,在利用线性潮流算法进行电压初值计算后,保留非线性算法收敛所需迭代次数大大降低,约为电压初值为额定电压时所需迭代次数的 1/3,极大地提高了保留非线性算法的收敛性能。同时其计算结果与 NR 法计算结果之间的误差也有进一步减小。从表 12 还可以看出,对比线性潮流算法计算结果与最终结果,系统含有 30 个节点时,其误差可达 0.052 77%。对于一些对精度要求比较高的场合,线性潮流算法是难以满足要求的。虽然初值计算可以改善保留非线性算法收敛性能,减少迭代次数,但算法也增加了计算初值的时间。从表 11 可以看出,增加初值计算环节后,保留非线性算法的计算速度有所降低,但对于大规模电网,其仍有明显速度优势。当系统含有 118 个节点时,保留非线性算法的计算速度约为 NR 法的 2 倍。并且随着电网规模的增大,收敛速度提升所减少的计算时间将大于初值计算消耗的时间。因此对于大规模电网,计算初值后再利用保留非线性算法进行潮流计算,其计算速度还将进一步提高。

表 11 不同拓扑下 LPF-RN 算法的计算结果

算例	30 节点	69 节点	118 节点
迭代次数	2	2	2
时间/s	0.000 794	0.003 971	0.004 526
最大误差(%)	$5.414\ 76 \times 10^{-8}$	$4.243\ 20 \times 10^{-8}$	$5.545\ 00 \times 10^{-8}$

表 12 线性潮流算法与 LPF-RN 法结果之间的误差

算例	30 节点	69 节点	118 节点
最大误差(%)	0.052 77	0.066 13	0.071 24

5 结论

本文首先分析了 VSC 的稳态模型和控制方式,然后考虑直流配电网中含有多个电压等级的情况,

建立了 DC-DC 变换器的稳态统一非理想模型,提出了一种基于保留非线性算法的直流配电网潮流计算方法。通过算例分析,获得如下结论。

(1) 在考虑 DC-DC 变换器非理想模型和 VSC 下垂控制的情况下,所推导的用于直流配电网的保留非线性算法潮流计算结果与 NR 法计算结果相当,验证了所提方法的正确性和可行性。

(2) 与 NR 法相比,保留非线性算法在计算速度方面拥有更大的优势。尤其是对于多电压等级、规模较大的直流配电网,保留非线性算法不但能保证计算精度,而且能够更快地获得潮流解。

(3) 电压初值会严重影响保留非线性算法的收敛特性,初值选取不当可能造成收敛速度大幅度下降甚至算法不收敛。若利用线性潮流算法所获潮流解作为保留非线性算法计算的初值,能大大减少算法收敛所需的迭代次数。

参 考 文 献

- [1] 张敬安,王雷涛,王鹏. 交直流混合配电网电能质量综合检测和补偿方法[J]. 电气工程学报, 2018, 13(9): 38-43.
ZHANG Jingan, WANG Leitao, WANG Peng. Power quality detection and compensation method of AC/DC hybrid distribution network[J]. Journal of Electrical Engineering, 2018, 13(9): 38-43.
- [2] 安海清,岳娜,李振东,等. 配电网中谐波传递特性研究[J]. 电气工程学报, 2019, 14(2): 86-91.
AN Haiqing, YUE Na, LI Zhendong, et al. Research on harmonic transfer characteristics in distribution network[J]. Journal of Electrical Engineering, 2019, 14(2): 86-91.
- [3] 曾嘉思,徐习东,赵宇明. 交直流配电网可靠性对比[J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2582-2589.
ZENG Jiasi, XU Xidong, ZHAO Yuming. Reliability comparison of AC and DC distribution network[J]. Power Grid Technology, 2014, 38(9): 2582-2589.
- [4] 郑欢,江道灼,杜翼. 交流配电网与直流配电网的经济性比较[J]. 电网技术, 2013, 37(12): 3368-3374.
ZHENG Huan, JIANG Daozhuo, DU Yi. Economic comparison of AC and DC distribution system[J]. Power Grid Technology, 2013, 37(12): 3368-3374.
- [5] 李霞林,郭力,王成山,等. 直流微电网关键技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 2-17.
LI Xialin, GUO Li, WANG Chengshan, et al. Key technologies of DC microgrids: An overview[J].

- Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 2-17.
- [6] 宋强, 赵彪, 刘文华, 等. 智能直流配电网研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(25): 9-19.
SONG Qiang, ZHAO Biao, LIU Wenhua, et al. An overview of research on smart DC distribution power network[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 9-19.
- [7] 马钊, 赵志刚, 孙媛媛, 等. 新一代低压直流供用电系统关键技术及发展展望[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(23): 12-22.
MA Zhao, ZHAO Zhigang, SUN Yuanyuan, et al. Key technologies and development prospect of new generation low-voltage DC power supply and utilization system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(23): 12-22.
- [8] 张朝学, 邹晓松, 余梦天, 等. 基于电压下垂控制的含 MMC 直流电网潮流计算方法研究[J]. 电力科学与工程, 2018, 34(11): 1-7.
ZHANG Chaoxue, ZOU Xiaosong, YU Mengtian, et al. Research on power flow calculation method based on voltage sagging for containing MMC DC power systems[J]. Electric Power Science and Engineering, 2018, 34(11): 1-7.
- [9] 和敬涵, 李智诚, 王小君, 等. 计及多种控制方式的直流电网潮流计算方法[J]. 电网技术, 2016, 40(3): 712-718.
HE Jinghan, LI Zhicheng, WANG Xiaojun, et al. Power flow algorithm for DC grid considering various control modes[J]. Power Grid Technology, 2016, 40(3): 712-718.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] HUSNAA W N, SIRAJ S F, MUIN M Z A. Modeling of DC-DC converter for solar energy system applications[C]// 2012 IEEE Symposium on Computers & Informatics(ISCII), Penang, Malaysia, 2012: 125-129.
- [13] BAHRAVAS, MAHERY H M, BABAEI E, et al. Mathematical modeling and transient analysis of DC-DC buck-boost converter in CCM[C]// IEEE 5th India International Conference on Power Electronics (IICPE), Delhi, India, 2012: 1-6.
- [14] 张卫平, 关晓菡, 刘元超, 等. DC-DC 变换器稳态建模的教学方法[J]. 电气电子教学学报, 2008, 30(5): 101-104.
ZHANG Weiping, GUAN Xiaohan, LIU Yuanchao, et al. Teaching method of building steady state models for DC-DC converters[J]. Journal of Electrical and Electronic Education, 2008, 30(5): 101-104.
- [15] 李韦姝. 直流配电网潮流计算模型及算法研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2015.
LI Weishu. Research on model and algorithm of power flow calculation in DC distribution network[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2015.
- [16] 孙银锋, 吴学光, 汤广福, 等. 基于节点阻抗矩阵 GS 法的直流电网稳态潮流计算[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(8): 1882-1892.
SUN Yinfeng, WU Xueguang, TANG Guangfu, et al. A nodal impedance matrix based Gauss-Seidel method on steady state power flow calculation of DC power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(8): 1882-1892.
- [17] 钱甜甜, 苗世洪. 基于节点电流关系的多端柔性直流输电系统潮流计算[J]. 电网技术, 2016, 40(5): 1308-1312.
QIAN Tiantian, MIAO Shihong. Power flow algorithm of multi-terminal VSC-HVDC system based on nodal current relation[J]. Power Grid Technology, 2016, 40(5): 1308-1312.
- [18] 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, 93.
WU Hongbin, YANG Chao, CHEN Yu, et al. VSC based power flow calculation of multi-terminal DC distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(11): 79-85, 93.
- [19] WU L L, FAN X W, XU M, et al. Research and application of a power-flow-calculation method in multiterminal VSC-HVDC power grid[J]. Global Energy Interconnection, 2019, 2(1): 37-44.
- [20] GAO S L, YE H, DU Y L, et al. A general decoupled AC/DC power flow algorithm with VSC-MTDC[C]// Proceedings of the 2018 13th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications(ICIEA 2018), Wuhan, China, 2018: 1779-1784.
- [21] MONTROYA D, GRISALES-NORENA L F, GONZALEZ-MONTOYA D, et al. Linear power flow

- formulation for low-voltage DC power grids[J]. Electric Power Systems Research, 2018, 163: 375-381.
- [22] 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.
- [23] 寇秋红, 李宝国, 鲁宝春. 一种改进的电力系统保留非线性潮流算法[J]. 辽宁工业大学学报, 2008(1): 10-12.
- KOU Qihong, LI Baoguo, LU Baochun. Improvement of retaining-nonlinear load flow algorithm[J]. Journal of Liaoning University of Technology, 2008(1): 10-12.
- [24] 秦孜. 改进非线性潮流算法在区域电网中的应用研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2019.
- QIN Zi. Application research of improved nonlinear power flow algorithm in regional power grid[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2019.
- [25] 侯博渊, 张荣祥. 保留非线性的快速 P-Q 解耦潮流算法[J]. 电机工程学报, 1984(1): 22-27.
- HOU Boyuan, ZHANG Rongxiang. The method of fast P-Q decoupled load flow calculation retaining non-linearity[J]. Proceedings of the CSEE, 1984(1): 22-27.
- [26] FAN S X, LIU X W, YANG Y H, et al. Power flow calculation method for DC distribution system with voltage source converter operation mode consideration[C]// 3rd International Conference on Energy Engineering and Environmental Protection (EEEEP), Sanya, China, 2018.
- [27] 刘天琪. 现代电力系统分析理论与方法[M]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- LIU Tianqi. Theory and method of modern power system analysis[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2016.
- [28] ZHANG D, FU Z C, ZHANG L C. An improved TS algorithm for loss-minimum reconfiguration in large-scale distribution systems[J]. Electric Power Systems Research, 2007, 77(5): 685-694.
-
- 作者简介: 刁守斌, 男, 1981 年生, 高级工程师。主要研究方向为电力系统稳定与控制。
E-mail: diaoshoubin@163.com
- 于涛, 男, 1980 年生, 工程师。主要研究方向为城市电网规划与运行。
E-mail: ghyyt@163.com
- 王健建(通信作者), 男, 1996 年生, 硕士研究生。主要研究方向为低压直流供电技术。
E-mail: wjj@mail.sdu.edu.cn
- 安鹏, 男, 1981 年生, 高级工程师。主要研究方向为电力系统规划与运行。
E-mail: 12536060@qq.com
- 李辛鹏, 男, 1980 年生, 高级工程师。主要研究方向为电网运行管理。
E-mail: lexpank@126.com