

基于序分量的孤岛交直流混联微电网三相解耦潮流算法

陈和升¹, 卫志农¹, 沈海平², 孙国强¹, 臧海祥¹, 孙永辉¹

(1. 河海大学 能源与电气学院, 江苏 南京 211100; 2. 国网无锡供电公司, 江苏 无锡 214061)

摘要: 针对交直流混联微电网这类新型网络的潮流分析问题, 建立了 Droop 型分布式电源以及 AC/DC 逆变器并网稳态潮流模型, 并根据并网点电压对称进行三相、单相并网模型的相序分量转换。利用序电流补偿法将 AC 子网解耦为三序网络且并行求解, 显著减小了问题求解规模; 进一步建立了 AC/DC 逆变器两侧交流频率和直流电压耦合关系, 有效解决了两子网间功率平衡问题。在序分量体系下提出了适用于直流微电网多种方式接入的孤岛交直流混联微电网三相解耦潮流算法, 基于 IEEE 等标准配电系统的修改算例, 验证了所提算法的有效性、适用性以及高计算效率。

关键词: 序分量; 孤岛微电网; 分布式电源; 三相解耦; 交直流混联; 潮流

中图分类号: TM 727; TM 744

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.09.005

0 引言

具有经济和环保双重优势的分布式发电(DG)技术正日趋成熟, 因而电网中 DG 装置的数目在不断增加^[1-2]。另外, 目前大部分用户侧负载、新型电动汽车、可再生能源发电以及储能装置都是采用直流方式进行并网, 建立直流微电网^[3-4]可减少电力变换环节、降低损耗、提高电能利用率。但由于传统交流电网的长期发展, 直流网络不可能完全取代现有交流网络。为此, 交直流混联微电网作为 DG 并网以及连接 AC/DC 网络的良好解决方案, 将成为未来配电系统的重要组成部分。

交直流混联微电网存在并网、孤岛 2 种运行方式。并网运行方式下, 其分析方法与现有较成熟的主动配电网分析^[5-6]相类似; 而孤岛运行方式下, 因与主网失去连接, 该混联配电系统需形成一个独立自治的孤岛供电体系, 满足 AC 及 DC 子网部分或全部负载的供电需求。为了提高运行可靠性, 孤岛微电网应采用下垂(Droop)控制策略, 使得网络中所有 DGs 共同分担全部负载; 同时, AC/DC 逆变器遵循交流侧频率与直流侧电压相耦合的运行准则^[7-8], 能更好地解决 AC 及 DC 子网之间功率平衡问题。

微电网潮流计算是微电网技术研究的一个重要领域, 是对微电网系统规划和运行方式的合理性、可靠性及经济性进行定量分析的重要工具。目前, 国内外学者主要关注点集中在微电网的运行控制

上, 对微电网潮流计算的研究并不多, 同时本文提到的交直流混联微电网自身运行特性更增加了潮流计算的难度。针对孤岛 AC 微电网, 将系统频率作为变量, 文献[9]提出了一种基于 BFGS 信赖域算法的三相潮流算法, 文献[10]克服前推回代需要平衡节点的限制, 建立了内外环交替迭代模型以求解孤岛微电网潮流问题, 两者都取得了较好的效果, 但当系统规模增加时, 计算效率都会明显降低。而文献[11]提出了交直流混联微电网这一概念, 并给出 AC/DC 连接点在潮流计算中的处理方式, 但计算过程未考虑 AC/DC 逆变器的损耗。文献[12-13]在序分量体系下建立基于逆变器并网的 PQ、PV 型 DG 稳态潮流模型, 并结合文献[14]提出的三相解耦潮流算法对所建 DG 并网模型进行验证。文献[15]考虑频率与直流电压之间的耦合关系, 提出基于牛顿法的孤岛交直流混联微电网潮流算法, 但由于其采用单相来描述系统, 无法准确体现系统的三相特性。综上所述, 该类电网的潮流算法大致可分为 2 类: 相分量法和序分量法。采用相分量法的优势在于物理概念明确, 易处理三相不对称元件, 但当系统规模过大时, 存在计算效率偏低等问题; 而采用序分量法可以对三相对称系统实现三序解耦, 显著减小问题求解规模, 但对于孤岛交直流混联微电网而言, 其具有三相不对称性、Droop 型 DG、直流网络以不同方式并网以及无平衡节点等特征, 导致无法直接应用传统序分了解耦法。

故本文在详细分析了 Droop 型 DG 和 AC/DC 逆变器三相、单相并网模型的相序分量转换与直流微电网潮流模型的基础上, 利用序电流补偿法以及建立系统频率和直流电压之间的耦合等式关系, 提出了适用于直流微电网多种方式接入的基于序分量的孤岛交直流混联微电网三相解耦快速潮流算法。最后基于 IEEE 等标准配电系统的修改算例, 验证了本

收稿日期: 2016-08-08; 修回日期: 2017-04-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51277052, 51507052); 中国博士后科学基金资助项目(2015M571653); 中央高校基本科研业务费资助项目(2015B02714)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (51277052, 51507052), China Postdoctoral Science Foundation (2015M571653) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (2015B02714)

文所提算法的有效性、适用性以及高计算效率。

1 AC 微电网建模

1.1 Droop 型 DG 模型

孤岛交流微电网中,大部分 DG 采用 Droop 特性来满足负载的需求,同时负责电压与系统频率的控制。Droop 节点示意图如图 1 所示。

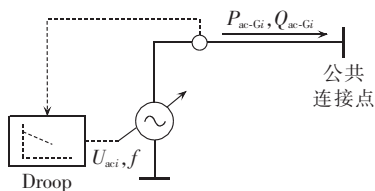


图 1 Droop 型 DG
Fig.1 Droop-type DG

$$P_{ac-Gi} = (f' - f) / m_{pi} \quad (1)$$

$$Q_{ac-Gi} = (U'_{aci} - U_{aci}) / n_{qi} \quad (2)$$

其中, f, f' 分别为 DG 输出电压实际频率值、初始频率设定值; m_{pi} 为有功功率静态下垂增益; P_{ac-Gi} 为 DG 三相注入总有功功率; U'_{aci}, U_{aci} 分别为 DG 输出电压的设定值、实际端口电压幅值; n_{qi} 为无功功率静态下垂增益; Q_{ac-Gi} 为 DG 三相注入总无功功率。由式(1)可看出, DG 的下垂特性保证了孤岛运行时系统频率稳定。节点 i 上 DG 的静态下垂增益 m_{pi}, n_{qi} 可根据电压和频率约束条件计算得到:

$$m_{pi} = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{P_{ac-Gi, \max}} \quad (3)$$

$$n_{qi} = \frac{U_{i, \max} - U_{i, \min}}{Q_{ac-Gi, \max}} \quad (4)$$

其中, $P_{ac-Gi, \max}, Q_{ac-Gi, \max}$ 分别为该 DG 三相注入总有功功率、总无功功率极限值; 频率值 f 和电压幅值 U_i 的上、下限可参照文献[16]设定。

1.2 AC/DC 逆变器模型

AC/DC 逆变器的主要控制目标是协调交直流网络功率分配从而满足负载需求[17]。这种运行模式不仅能增加孤岛运行方式的供电可靠性,同时还能通过交直流网络混联共享的方式减少系统储备容量。为了便于实现上述控制目标,可建立交流系统频率 f_{pu} 与直流系统接入点电压 $U_{pu,i}$ 标么化后的等式联系为:

$$f_{pu} = U_{pu,i} \quad \forall i \in N_c \quad (5)$$

$$f_{pu} = \frac{f - 0.5(f_{\max} + f_{\min})}{0.5(f_{\max} - f_{\min})}$$

$$U_{pu,i} = \frac{U_{dc,i} - 0.5(U_{dc, \max} + U_{dc, \min})}{0.5(U_{dc, \max} - U_{dc, \min})}$$

其中, N_c 为 AC 子网中 AC/DC 逆变器节点的集合; $f_{\max}, f_{\min}$ 分别为系统频率上、下限; $U_{dc, \max}, U_{dc, \min}$ 分别为直流节点电压上、下限。通过化简等式可得交流系统频率与直流节点电压的等式关系为:

$$a_f f - a_U U_{dc,i} - a_{fU} = 0 \quad (6)$$

$$a_f = \frac{2}{f_{\max} - f_{\min}}, \quad a_U = \frac{2}{U_{dc, \max} - U_{dc, \min}}$$

$$a_{fU} = \frac{f_{\max} + f_{\min}}{f_{\max} - f_{\min}} - \frac{U_{dc, \max} + U_{dc, \min}}{U_{dc, \max} - U_{dc, \min}}$$

其中, a_f, a_U, a_{fU} 为等式化简后的变量系数。

为了更加符合实际情况,在潮流计算过程中考虑 AC/DC 逆变器传输损耗[18]为:

$$P_{c-loss,i} = C_0 + C_1 I_{c-ac,i} + C_2 I_{c-ac,i}^2 \quad (7)$$

其中, $P_{c-loss,i}$ 为逆变器有功损耗; $I_{c-ac,i}$ 为逆变器交流侧注入电流; C_0, C_1 及 C_2 为二次函数的系数。

2 并网相序分量转换

孤岛微电网中含有大量逆变器装置,上述 Droop 型 DG 以及直流微电网都需经过逆变器的转换才能并入交流网络。对于实际的逆变电源,为了实现特定的控制方式,其控制对象一般为三相注入的总有功和总无功功率,而电压控制目标为正序电压。因此,并网处采用序分量模型相比于采用相分量模型,能更准确地反映逆变器装置的实际控制模式,同时也能更好地适用于基于序分量的三相潮流计算。

逆变器三相并网时,并网点注入总功率 S_p 为:

$$S_p = [U_A \ U_B \ U_C] \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix}^* = U_p^T I_p^* \quad (8)$$

其中, U_A, U_B, U_C 分别为 A、B、C 相并网点电压相量; I_A, I_B, I_C 分别为 A、B、C 相并网点注入电流; T 代表矩阵转置; $*$ 代表相量共轭。

而在逆变器控制特性下并网节点呈现三相电压对称状态[9],即有:

$$\begin{cases} U_i^A = U_i^B = U_i^C \\ \theta_i^A = \theta_i^B + 2\pi/3 = \theta_i^C - 2\pi/3 \end{cases} \quad (9)$$

根据相序分量变换矩阵 $T_p^s = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}$, 其中

$a = e^{j2\pi/3}$, 则有:

$$\begin{bmatrix} U_0 \\ U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = (T_p^s)^{-1} \begin{bmatrix} U^A \angle \theta^A \\ U^A \angle (\theta^A - 2\pi/3) \\ U^A \angle (\theta^A + 2\pi/3) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ U^A \angle \theta^A \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

将电压转换式(10)代入式(8)中,可得:

$$S_p = (T_p^s U_s)^T (T_p^s I_s)^* = U_s^T (T_p^s)^T (T_p^s)^* I_s^* = 3S_s \quad (11)$$

$$U_s = [U_0 \ U_1 \ U_2]^T, \quad I_s = [I_0 \ I_1 \ I_2]^T$$

其中, S_s 为三序总功率。由式(10)可知,负序与零序电压为 0,则对应功率也为 0,从而可得正序功率为原三相总功率的 1/3。由此可建立逆变器并网点的三相注入总功率的相序分量转换关系。

逆变器单相并网时,并网点单相注入电流为:

$$I_{in}^m = \left(\frac{P_c^m + jQ_c^m}{U_c} \right)^* \quad (12)$$

其中, $m \in \{A, B, C\}$; U_c 为节点电压相量; P_c 、 Q_c 分别为逆变器并网点注入有功、无功功率。

根据相序分量转换关系可得:

$$I_{in}^0 = \frac{1}{3} I_{in}^m, I_{in}^1 = \frac{X}{3} I_{in}^m, I_{in}^2 = \frac{X^2}{3} I_{in}^m \quad (13)$$

$$X = \begin{cases} 1 & m=A \\ a & m=B \\ a^2 & m=C \end{cases}$$

故将单相并网逆变器的相分量电气量转化为序分量电气量,便于序分量潮流模型求解。

3 DC 微电网建模

任一直流节点注入功率 $P_{dc,i}$ 满足:

$$P_{dc,i} = U_{dc,i} \sum_{j=1}^{N_{dc}} Y_{dc,ij} U_{dc,j} \quad (14)$$

其中, $U_{dc,i}$ 、 $U_{dc,j}$ 为直流子网节点电压; $Y_{dc,ij}$ 为节点导纳矩阵元素; N_{dc} 为直流子网节点数量。

直流子网中有些 DG 以恒功率方式向网络中注入功率^[19],而大部分 DG 采用 Droop 控制方式($I-U$ 或 $P-U$)来承担系统负载,具体表达式如下:

$$P_{dc-Gi} = (U'_{dc,Pi} - U_{dc,i}) / \vartheta_P \quad (15)$$

$$I_{dc-Gi} = (U'_{dc,Ii} - U_{dc,i}) / \vartheta_I \quad (16)$$

其中, P_{dc-Gi} 、 I_{dc-Gi} 分别为 DG 输出功率、输出电流; $U'_{dc,Pi}$ 、 $U'_{dc,Ii}$ 为 DG 参考电压; ϑ_P 、 ϑ_I 分别为 DG 输出功率、输出电流的静态下垂增益。节点 i 上 DG 的静态下垂增益可根据直流微电网电压等级约束条件计算得到:

$$\vartheta_{P,i} = P_{dc-Gi,max} / (U_{dc,max} - U_{dc,min}) \quad (17)$$

$$\vartheta_{I,i} = I_{dc-Gi,max} / (U_{dc,max} - U_{dc,min}) \quad (18)$$

其中, $P_{dc-Gi,max}$ 、 $I_{dc-Gi,max}$ 分别为 DG 输出功率、输出电流的极限值; $U_{dc,max}$ 、 $U_{dc,min}$ 分别为直流子网系统电压上、下限允许值。

4 基于序分量的交直流三相解耦潮流计算

4.1 交流微电网潮流

首先运用线路序电流补偿法^[14]进行交流子网三相解耦,简化交流子网三相不对称的复杂性,减小问题求解规模,具体过程如下。

状态量的相序转换为:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_p = \mathbf{T}_s^p \mathbf{x}_s \\ \mathbf{x}_s = (\mathbf{T}_s^p)^{-1} \mathbf{x}_p \end{cases} \quad (19)$$

其中, $\mathbf{x}_p = [\mathbf{x}_A \ \mathbf{x}_B \ \mathbf{x}_C]^T$, $\mathbf{x}_s = [\mathbf{x}_0 \ \mathbf{x}_1 \ \mathbf{x}_2]^T$, $\mathbf{x} \in \{U, I\}$, 下标 0、1 和 2 分别代表三序网络中的零序、正序和负序,下标 A、B 和 C 分别代表 A 相、B 相和 C 相。

线路导纳的相序转换为:

$$\mathbf{y}^{012} = (\mathbf{T}_s^p)^{-1} \mathbf{y}^{ABC} \mathbf{T}_s^p \quad (20)$$

其中, $\mathbf{y}^{ABC}$ 为交流子网中的线路相分量导纳矩阵; $\mathbf{y}^{012}$

为交流子网中的线路序分量导纳矩阵,其对角线元素对应着三序网络的零序、正序和负序导纳。由于交流子网线路参数三相不对称,导致三序网络存在耦合关系,而采用线路序电流补偿法^[14]后,将非对角线序导纳以序电流补偿的方式加入线路两端的节点注入序电流中,其线路序分量导纳矩阵可简化为只含对角线元素组成的 3×3 阶对角阵,即整个交流子网完全解耦,进而三序网络可并行求解。

正序网络基于传统牛拉法,假设每个节点都有 DG、负载及直流子网连接,依次建立正序分量节点功率平衡方程为:

$$\begin{cases} h_{ac,Pi}^1 = \frac{1}{3} P_{ac-Gi} + P_{c-ac,i}^1 - P_{ac-Li}^1 - P_{ac,i}^1 \\ h_{ac,Qi}^1 = \frac{1}{3} Q_{ac-Gi} - Q_{ac-Li}^1 - Q_{ac,i}^1 \end{cases} \quad (21)$$

其中, $h_{ac,Pi}^1$ 、 $h_{ac,Qi}^1$ 分别为节点正序有功、无功功率不平衡量; $P_{c-ac,i}^1$ 为 AC/DC 逆变器向交流子网注入的正序有功功率; $P_{ac,i}^1$ 、 $Q_{ac,i}^1$ 分别为节点注入正序有功、无功功率; P_{ac-Li}^1 、 Q_{ac-Li}^1 分别为节点负载通过注入电流相序分量转换得到的正序有功、无功功率,具体求解可参见文献^[14]。另外:

$$\begin{cases} P_{ac,i}^1 = U_{ac,i}^1 \sum_{j=1}^{N_{ac}} U_{ac,j}^1 (G_{ij}^1 \cos \theta_{ij}^1 + B_{ij}^1 \sin \theta_{ij}^1) \\ Q_{ac,i}^1 = U_{ac,i}^1 \sum_{j=1}^{N_{ac}} U_{ac,j}^1 (G_{ij}^1 \sin \theta_{ij}^1 - B_{ij}^1 \cos \theta_{ij}^1) \end{cases} \quad (22)$$

其中, U_{ac}^1 为正序电压幅值; θ_{ij}^1 为正序电压相角差; G_{ij}^1 、 B_{ij}^1 分别为正序节点导纳矩阵实部、虚部。

对于交流子网而言,整个直流子网可作为一个整体通过 AC/DC 逆变器向并网点注入有功功率。以直流子网通过 AC/DC 逆变器三相并网方式为例进行统一说明,具体如下。

$$P_{c-ac,i}^1 = (-P_{c-loss,i} - P_{c-dc,j}) / 3 \quad (23)$$

其中, $P_{c-dc,j}$ 为逆变器直流侧注入有功功率,作为交直流网络潮流计算交替迭代的中间变量。

交流子网共有 N_{ac} 个节点,对于正序网络而言,对应应有 $2N_{ac}$ 个节点电压变量 U_{ac} 和 θ_{ac} 以及 1 个系统频率变量 f 。通过上述过程已建立 $2N_{ac}$ 个功率平衡方程,同时选取第一个节点电压相角作为参考相角,并设为 0,此时满足求解要求。具体迭代方程如下:

$$\begin{bmatrix} U_{ac}^{1(l+1)} \\ \theta_{ac}^{1(l+1)} \\ f^{(l+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{ac}^{1(l)} \\ \theta_{ac}^{1(l)} \\ f^{(l)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{\partial h_{ac,P}^{1(l)}}{\partial U_{ac}^{1(l)}} & \frac{\partial h_{ac,P}^{1(l)}}{\partial \theta_{ac}^{1(l)}} & \frac{\partial h_{ac,P}^{1(l)}}{\partial f} \\ \frac{\partial h_{ac,Q}^{1(l)}}{\partial U_{ac}^{1(l)}} & \frac{\partial h_{ac,Q}^{1(l)}}{\partial \theta_{ac}^{1(l)}} & \frac{\partial h_{ac,Q}^{1(l)}}{\partial f} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} h_{ac,P}^{1(l)} \\ h_{ac,Q}^{1(l)} \end{bmatrix} \quad (24)$$

其中, l 为迭代次数。

另一方面,零序、负序网络可参照文献^[12]中潮流处理方式,线性求解得到节点电压为:

$$\begin{aligned} U_0 &= (Y_0)^{-1} I_0 \\ U_2 &= (Y_2)^{-1} I_2 \end{aligned} \quad (25)$$

其中, I_0 、 I_2 分别为节点零序、负序注入电流; Y_0 、 Y_2 分

别为零序、负序网络节点导纳矩阵。

4.2 AC/DC 逆变器功率传输

对于直流子网而言,整个交流子网可作为整体通过 AC/DC 逆变器向并网点注入有功功率 $P_{c,t}$ 为:

$$P_{c,t} = \left(\sum_{i=1}^{N_g} P_{ac,Gi} - P_{ac,Li} \right) - P_{ac,loss} \quad (26)$$

忽略系统线路损耗 $P_{ac,loss}$, 该注入有功功率随着系统频率的变化量为:

$$\frac{\partial P_{c,t}}{\partial f} = - \sum_{i=1}^{N_g} \frac{1}{m_{pi}} \quad (27)$$

基于式(27)及下垂特性 P/f , 可建立两子网间交换总有功功率与系统频率的表达式为:

$$P_{cd,t} = \frac{1}{m_{p,ac}} (f'_{ac} - f) \quad (28)$$

$$\frac{1}{m_{p,ac}} = - \frac{\partial P_{c,t}}{\partial f}, f'_{ac} = P_{c,t} + f$$

其中, $m_{p,ac}$ 和 f'_{ac} 分别为等效的下垂增益、系统频率设定值。进一步通过系统频率与直流电压的等式联系, 将式(28)代入式(6)中, 化简后得到逆变器直流侧并网点边界平衡方程为:

$$h_{c,i} = P_{c,t} + \bar{a}_{U,i} U_{dc,i} + a_{PU,i} \quad (29)$$

$$\bar{a}_{U,i} = \frac{a_{U,i}}{m_{p,ac} a_{f,i}}, a_{PU,i} = \frac{a_{fU,i} - a_{f,i} f'_{ac}}{m_{p,ac} a_{f,i}}$$

其中, $h_{c,i}$ 为逆变器直流侧并网点功率不平衡量。

由式(29)可知, 交流子网中系统频率变量由直流子网节点电压变量替换, 使其在直流潮流计算中可参与迭代并更新边界信息。

4.3 直流微电网潮流

同样假设每个节点接入 DG、负载, 与交流子网正序网络求解相类似, 依次建立每个节点的功率平衡方程为:

$$h_{dc,Pi} = P_{dc,Gi} + P_{c-dc,i} - P_{dc,Li} - P_{dc,i} \quad (30)$$

其中, $h_{dc,Pi}$ 为直流子网节点功率不平衡量。

对于直流子网, 共有 N_{dc} 个节点电压变量 U_{dc} 及 1 个逆变器直流侧注入有功功率 P_{c-dc} , 而由式(29)和(30)可建立 $N_{dc} + 1$ 个平衡方程, 满足求解要求, 可得下列迭代方程为:

$$\begin{bmatrix} U_{dc}^{(l+1)} \\ P_{c-dc}^{(l+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{dc}^{(l)} \\ P_{c-dc}^{(l)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{\partial h_{dc,P}}{\partial U_{dc}} & \frac{\partial h_{dc,P}}{\partial P_{c-dc}} \\ \frac{\partial h_c}{\partial U_{dc}} & \frac{\partial h_c}{\partial P_{c-dc}} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} h_{dc,P}^{(l)} \\ h_c^{(l)} \end{bmatrix} \quad (31)$$

在交流子网及直流子网更新状态变量后, 进行收敛判断, 若上述平衡方程未满足精度要求 ε , 则再次重复更新系统状态变量, 直至收敛, 输出结果。算法流程图如图 2 所示。

5 算例测试

5.1 算例 1

基于文献[20], 修改原有 6 节点三相不平衡系

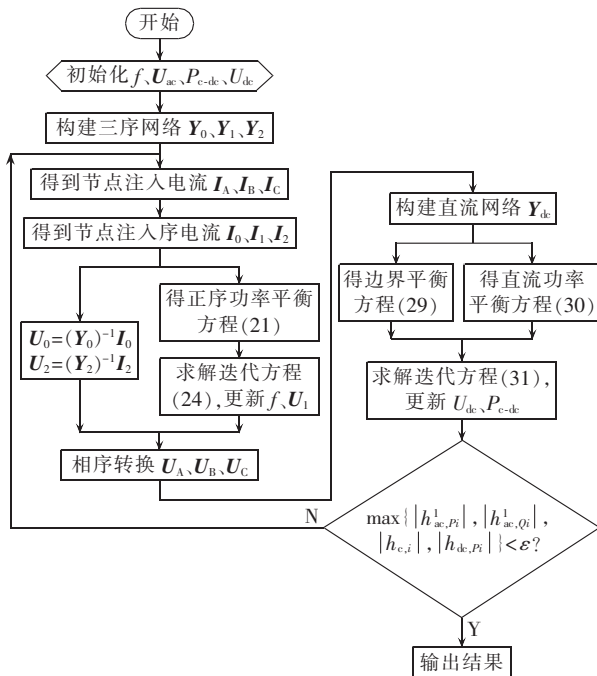


图 2 算法流程图

Fig.2 Flowchart of algorithm

统, 搭建孤岛交直流混联微电网测试系统, 如图 3 所示。交流三相 6 节点系统中, 在节点 1 上三相并网接入 1 个 Droop 型 DG; 直流单相系统中, 在节点 1'、3' 上分别接入 Droop 型 DG 及在节点 5' 上接入 1 个恒功率 DG。交直流网络通过 AC/DC 逆变器在支路 7-2' 上实现连接。

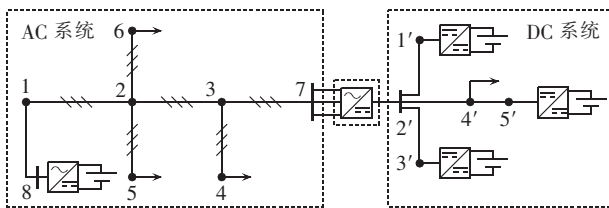


图 3 孤岛交直流混联微电网系统

Fig.3 Islanded hybrid AC/DC microgrid

5.1.1 有效性

为了验证本文所提算法的有效性, 将文献[15]中孤岛交直流混联微电网潮流处理方法与文献[9]中 Droop 型 DG 三相并网模型相结合, 计算所得结果作为潮流准确值, 并与用本文算法计算所得潮流结果进行比较, 具体见表 1、2。表中, U_A 、 U_B 、 U_C 、 U_{dc} 均为标么值。采用文献算法、本文算法得到的 AC/DC 逆变器交流侧注入总有功功率分别为 0.1128 p.u.、0.1129 p.u.。由此可知, 本文算法与文献算法在同样收敛条件 (10^{-5}) 下, 潮流计算结果基本一致, 验证了本文算法的有效性。其中交流子网三相电压幅值最大误差、平均误差分别为 0.0197%、0.0112%, 两者系统频率 f 计算值都为 0.9996 p.u.。

表 1 AC 系统测试结果
Table 1 Test results of AC system

方法	节点	U_A	$\theta_A/(^{\circ})$	U_B	$\theta_B/(^{\circ})$	U_C	$\theta_C/(^{\circ})$
文献 算法	1	0.9953	0.0094	0.9948	-120.0270	0.9953	120.0176
	2	0.9912	-0.0677	0.9900	-120.2293	0.9926	119.8579
	3	0.9840	-0.5553	0.9840	-120.5736	0.9844	119.4331
	4	0.9812	-0.6133	0.9819	-120.6873	0.9829	119.3020
	5	0.9907	-0.0179	0.9880	-120.3092	0.9932	119.8276
	6	0.9892	-0.1378	0.9887	-120.3033	0.9910	119.7795
	7	0.9841	-0.5430	0.9841	-120.5430	0.9841	119.4570
	8	0.9966	0.1404	0.9966	-119.8596	0.9966	120.1404
本文 算法	1	0.9954	0.0093	0.9949	-120.0267	0.9953	120.0175
	2	0.9912	-0.0670	0.9901	-120.2269	0.9926	119.8593
	3	0.9842	-0.5495	0.9842	-120.5676	0.9846	119.4391
	4	0.9814	-0.6069	0.9821	-120.6801	0.9831	119.3093
	5	0.9908	-0.0177	0.9881	-120.3060	0.9932	119.8294
	6	0.9893	-0.1364	0.9888	-120.3002	0.9911	119.7818
	7	0.9843	-0.5373	0.9843	-120.5373	0.9843	119.4627
	8	0.9966	0.1389	0.9966	-119.8611	0.9966	120.1389

表 2 DC 系统测试结果
Table 2 Test results of DC system

方法	节点	U_k	方法	节点	U_k
文献 算法	1'	0.9983	本文 算法	1'	0.9983
	2'	0.9837		2'	0.9839
	3'	0.9973		3'	0.9973
	4'	0.9586		4'	0.9591
	5'	0.9617		5'	0.9621

5.1.2 测试 AC/DC 逆变器功率调节

对于孤岛交直流混联微电网而言,AC/DC 逆变器功率传输情况值得关注。基于图 3 中的测试系统,为了便于观察系统中功率流向情况,逐渐增加交流子网负载率,同时保持直流子网负载恒定。根据本文算法不仅可监测三相注入总功率量,也可监测每相功率注入的详细情况。图 4 为 4 个变量随负载率变化趋势图,都以标幺化的形式给出,图中,由上至下依次为 AC/DC 逆变器交流侧三相注入总有功功率 $P_{c-ac,i}$ 、AC/DC 逆变器交流侧单相注入有功功率 $P_{c-ac,i}^m$ 、DG 三相注入总有功功率 P_{ac-DG} 、DG 单相注入

有功功率 P_{ac-DG}^m 。此处 AC/DC 逆变器为图 3 中支路 7-2' 间逆变器装置,此处 DG 为节点 8 上三相并网接入的 Droop 型 DG。
整个系统运行过程以 AC/DC 逆变器的总有功功率极值限制为分界点,可划分为 4 个运行区域。由图 4 可知,在变化起始阶段,AC 子网负载相对于 DC 子网较轻,通过 AC/DC 逆变器,AC 子网向 DC 子网输送多余功率。在初始及最终阶段,DG 注入总有功功率变化曲线斜率略大,这是因为 AC/DC 逆变器受到极值限制,注入有功功率为定值,网络中负载的增加全部由 AC 子网中 DG 承担。在中间 2 段过程中,随着 AC 子网负载的进一步增加,AC/DC 逆变器转变功率流向,由 DC 子网向 AC 子网输送功率,直至达到功率极值。

另一方面,AC 子网中负载及网络组件具有一定不对称性。与传统处理方法近似认为 DG 三相注入功率对称不同,基于本文算法的序分量三相并网潮流模型,在整个系统变化过程中,可准确反映 AC/DC 逆变器及 DG 三相功率不对称输出特性。分析图中曲线变化趋势可知,随着负载率增加,AC 子网负载不对称性进一步增加,AC/DC 逆变器及交流子网中 DG 各相注入有功功率差距也相应拉大。由以上分析可知,本文算法能准确反映交直流子网间功率注入情况以及能有效应对交流子网三相不对称问题。

5.2 算例 2

为了测试本文算法应对直流微电网以多种并网方式接入交流网络问题的效果,将原 IEEE 34 节点交流系统^[21]进行三相补全,去掉三相调压器,同时在节点 11、26 分别通过 AC/DC 逆变器接入 DC₁、DC₂ 直流系统,并在节点 25、34 分别接入 Droop 型 DG,具体的测试系统如图 5 所示。两直流系统网络参数相同,不同的是 DC₁ 系统单相并网(B 相)而 DC₂ 系统三相并网,DC₁ 所带负载是 DC₂ 的 1/4。整个系统中的 DG 都采用 Droop 控制方式来维持孤岛微电网无

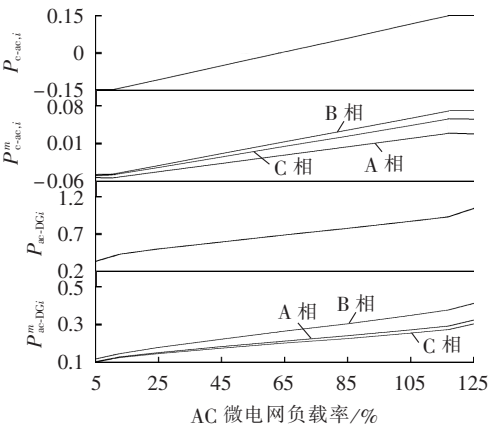


图 4 输出功率变化趋势图
Fig.4 Variation trend of power outputs

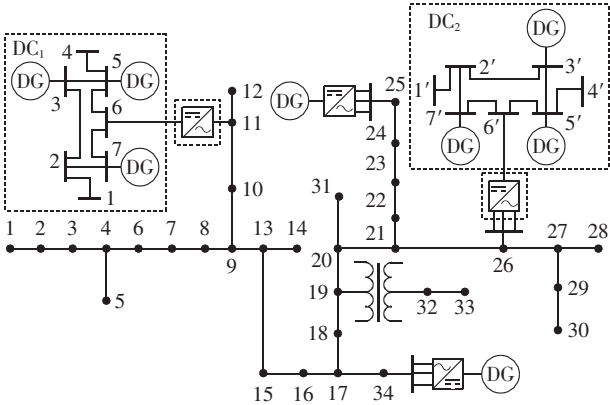


图 5 多直流混联孤岛微电网测试系统
Fig.5 Islanded hybrid AC/DC microgrid with multiple DC networks

平衡节点时的功率平衡。

5.2.1 适应性

采用本文算法对上述测试系统进行潮流求解,在收敛精度为 10^{-5} 情况下迭代达到收敛。由于涉及的数据过多,同时本文关注点为不平衡系统中各相功率分布情况,因此只针对各 DG 及 AC/DC 逆变器注入有功功率分布(均为标么值)进行分析讨论,具体如表 3、4 所示。并网节点 11、37 的 AC/DC 逆变器交流侧注入总有功功率分别为 0.688 7 p.u.、0.400 8 p.u.。系统频率 f 计算值为 0.991 4 p.u.。

表 3 AC 系统测试结果
Table 3 Test results of AC system

节点	P_{m-A}	P_{m-B}	P_{m-C}
11	—	0.688 7	—
37	0.125 2	0.065 5	0.210 2
35	0.685 4	0.520 0	0.694 4
36	0.915 0	0.709 5	1.006 6

表 4 DC 系统测试结果
Table 4 Test results of DC systems

节点	DC ₁ 注入有功功率	节点	DC ₂ 注入有功功率
3	0.210 0	3'	0.230 6
5	0.301 0	5'	0.316 9
7	0.303 3	7'	0.322 7

因 DC₂ 系统负载较重,DC₂ 系统中各 DG 相比于 DC₁ 系统中各 DG 注入有功功率更大。另一方面,与算例 1 中注入功率随负载率变化的趋势相同,轻载的 DC₁ 系统向 AC 子网注入有功功率更多。由上述分析可知,交直流网络以混联的方式相互支撑,各 DG 在 Droop 控制下共同满足负载需求,能很好地缓解电网中电源、负载不均衡的问题。

图 6 为 DC₁、DC₂ 直流系统节点电压幅值(标么值)具体结果的柱状图。对比两者可明显看出,DC₁ 系统节点电压略高于 DC₂ 系统,这与上述分析的注入有功功率及负载情况相符。另外,单相并网的 DC₁ 系统与三相并网的 DC₂ 系统共同点是节点 6 和节点 6' 电压相同,这是由于两系统都是通过 AC/DC 逆变器并入同一 AC 子网。基于本文算法,建立了逆变器两侧系统频率与直流系统接入点电压耦合关系,从而表明并网点直流电压跟随同一交流系统频率变化。

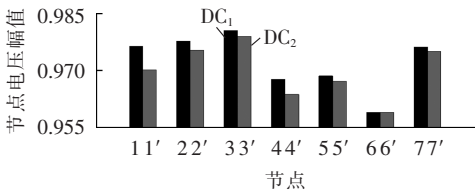


图 6 DC₁ 和 DC₂ 系统节点电压对比
Fig.6 Comparison of nodal voltage between DC₁ and DC₂

5.2.2 计算效率

本文算法采用的是交直流网络交替迭代求解潮

流,故可单独分析网络构成较为复杂的 AC 子网对计算效率的影响。基于 IEEE 13、IEEE 34、IEEE 123 节点标准系统^[19],去掉三相调压器并在相应节点添加适量 Droop 型 DG 构成孤岛交流微电网测试系统。运用本文算法中的 AC 子网潮流处理方式对测试系统进行一一求解;同时为了增加对比性,考虑传统相分量未解耦潮流模型,将传统牛拉法与文献[14]中 Droop 型 DG 并网方式相结合求解潮流,命名为算法 1;进一步地,在本文序分量三相解耦的基础上,将文献[10]中单相前推回代算法应用于正序网络求解潮流,命名为算法 2。3 种算法在同样的计算机环境和收敛条件下进行测试。

表 5 为 3 种算法达到收敛时所需要的迭代次数。分析可知,本文算法及算法 1 能够保持稳定的收敛性能,而算法 2 的迭代次数随着系统规模增大而逐渐增加。结合图 7 中计算时间对比结果可知,随着系统规模增大,本文算法由于采用三相解耦并行求解,相比于算法 1、2,计算时间显著减少。

表 5 迭代次数
Table 5 Numbers of iteration

测试系统	迭代次数		
	本文算法	算法 1	算法 2
IEEE 13	5	5	16
IEEE 34	4	5	19
IEEE 123	5	5	21

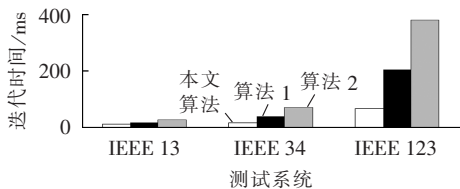


图 7 潮流算法的计算时间比较
Fig.7 Comparison of computing time

进一步分析可知,算法 2 也是在序分量的基础上进行求解,但由于文献[10]中采用前推回代内外环交替求解算法以适用含 Droop 型 DG 的孤岛微电网潮流计算,这样的处理方式导致内环需多次被外环调用以达到收敛。前推回代算法本身收敛特性为线性收敛,随着系统规模的增大,内环矩阵维数显著增加,同时外环的迭代次数也相应增加,导致算法 2 的计算耗时较长。综上所述,本文算法在计算效率和收敛性能上更具优越性。

6 结论

本文针对 AC 子网三相不平衡以及 DC 子网多种方式接入等运行情况,提出了一种基于序分量的孤岛交直流混联微电网三相解耦潮流算法,可作为分析该类交直流网络的稳态运行、设计相应控制策略和

研究配备相关保护装置时的重要工具。通过算例测试分析可知本文算法具有如下特点:

a. 相序分量转换关系可准确保留 Droop 型 DG 以及 AC/DC 逆变器并网点注入功率不对称特性;

b. 所建立的 AC/DC 逆变器交流侧频率和直流侧电压耦合关系,有效解决了交直流子网间功率平衡问题;

c. 利用线路序电流补偿法将 AC 子网三序完全解耦及并行求解,显著减小了问题求解规模,极大地提高了潮流计算效率。

参考文献:

- [1] 王成山,王丹,周越. 智能配电系统架构分析及技术挑战[J]. 电力系统自动化,2015,39(9):2-9.
WANG Chengshan,WANG Dan,ZHOU Yue. Framework analysis and technical challenges to smart distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(9):2-9.
- [2] 李鹏,窦鹏冲,李雨薇,等. 微电网技术在主动配电网中的应用[J]. 电力自动化设备,2015,35(4):8-16.
LI Peng,DOU Pengchong,LI Yuwei,et al. Application of micro-grid technology in active distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(4):8-16.
- [3] GUERRERO J M,LOH P C,LEE T L,et al. Advanced control architectures for intelligent microgrids-part II:power quality,energy storage,and AC/DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2013,60(4):1263-1270.
- [4] 施婕,郑漳华,艾芊. 直流微电网建模与稳定性分析[J]. 电力自动化设备,2010,30(2):86-90.
SHI Jie,ZHENG Zhanghua,AI Qian. Modeling of DC micro-grid and stability analysis[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(2):86-90.
- [5] 卫志农,陈胜,孙国强,等. 含多类型的主动配电网分布式三相状态估计[J]. 电力系统自动化,2015,39(9):68-74.
WEI Zhinong,CHEN Sheng,SUN Guoqiang,et al. Distributed three-phase state estimation for active distribution network integrated with different types of distributed generators[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(9):68-74.
- [6] 杨雄,卫志农,孙国强,等. 含分布式电源的配电网三相解耦潮流计算方法[J]. 电力自动化设备,2014,34(3):99-107,131.
YANG Xiong,WEI Zhinong,SUN Guoqiang,et al. Decoupled three-phase power flow calculation network with DGs[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(3):99-107,131.
- [7] LOH P C,LI D,CHAI Y K,et al. Autonomous operation of hybrid microgrid with AC and DC subgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2013,28(5):2214-2223.
- [8] EGHTEHDARPOUR N,FARJAH E. Power control and management in a hybrid AC/DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2014,5(3):1494-1505.
- [9] ABDELAZIZ M,FARAG H E,EL-SAADANY E F,et al. A novel and generalized three-phase power flow algorithm for islanded microgrids using a Newton trust region method[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2013,28(1):190-201.
- [10] DIAZ G,GOMEZ-ALEIXANDRE J,COTO J. Direct backward/forward sweep algorithm for solving load power flows in AC droop-regulated microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2015,7(5):1-9.
- [11] LI C,CHAUDHARY S K,VASQUEZ J C,et al. Power flow analysis for droop controlled LV hybrid AC-DC microgrids with virtual impedance[C]//PES General Meeting Conference & Exposition. Washington DC,USA:IEEE,2014:1-4.
- [12] KAMH M Z,IRAVANI R. A unified model of three-phase electronically-coupled distributed energy resources for power-flow analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2011,26(2):899-909.
- [13] KAMH M Z,IRAVANI R. Steady-state model and power-flow analysis of single-phase electronically coupled distributed energy resources[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2012,27(1):131-139.
- [14] ABDEL-AKHER M,NOR K M,RASHID A H A. Improved three-phase power-flow methods using sequence components[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2005,20(3):1389-1397.
- [15] HAMAD A A,AZZOUZ M,EL-SAADANY E F. A sequential power flow algorithm for islanded hybrid AC/DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2016,31(5):3961-3970.
- [16] POGAKU N,PRODANOVIC M,GREEN T C. Modeling,analysis and testing of autonomous operation of an inverter-based microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2007,22(2):613-625.
- [17] 周稳,戴瑜兴,毕大强,等. 交直流混合微电网协同控制策略[J]. 电力自动化设备,2015,35(10):51-57.
ZHOU Wen,DAI Yuxing,BI Daqiang,et al. Coordinative control strategy for hybrid AC-DC microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(10):51-57.
- [18] DAELEMANS G,SRIVASTAVA K,REZA M,et al. Minimization of steady-state losses in meshed networks using VSC HVDC[C]//Power & Energy Society General Meeting. Calgary,Canada:IEEE,2009:1-5.
- [19] 孙鹏飞,贺春光,邵华,等. 直流配电网研究现状与发展[J]. 电力自动化设备,2016,36(6):1-10.
SUN Pengfei,HE Chunguang,SHAO Hua,et al. Research status and development of DC distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(6):1-10.
- [20] 王守相,王成山. 现代配电系统分析[M]. 北京:高等教育出版社,2007:211-212.
- [21] KERSTING W H. Radial distribution test feeders[C]//Power Engineering Society Winter Meeting. Columbus,Ohio,USA:IEEE,2001:975-985.

作者简介:



陈和升

陈和升(1990—),男,安徽无为,人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统状态估计(E-mail:chenheshengran@163.com);

卫志农(1962—),男,江苏江阴人,教授,博士,主要研究方向为电力系统运行分析和控制、输配电系统自动化等(E-mail:wzn_nj@263.net);

陈和升 沈海平(1976—),男,江苏无锡人,高级工程师,主要研究方向为电力自动化、电网运行(E-mail:hpshe@126.com)。

(下转第45页 continued on page 45)

- [12] VALENCIA F,SÁEZ D,COLLADO J,et al. Robust energy management system based on interval fuzzy models[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology,2016,24(1):140-157.
- [13] 丁明,张颖媛,茆美琴,等. 包含钠硫电池储能的微网系统经济运行优化[J]. 中国电机工程学报,2011,31(4):7-14.
DING Ming,ZHANG Yingyuan,MAO Meiqin,et al. Economic operation optimization for microgrids including Na/S battery storage[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(4):7-14.
- [14] 黄伟,黄婷,周欢,等. 基于改进微分进化算法的微电网动态经济优化调度[J]. 电力系统自动化,2014,38(9):211-217.
HUANG Wei,HUANG Ting,ZHOU Huan,et al. Dynamic economical dispatch for microgrid based on improved differential evolution algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(9):211-217.

- [15] 钱科军,袁越,石晓丹,等. 分布式发电的环境效益分析[J]. 中国电机工程学报,2008,28(29):11-15.
QIAN Kejun,YUAN Yue,SHI Xiaodan,et al. Environmental benefits analysis of distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(29):11-15.

作者简介:



吕智林

吕智林(1971—),女,广西南宁人,教授,博士,研究方向为微电网的优化与控制、复杂系统控制与优化(E-mail:luzhilin2001@163.com);

汤泽琦(1990—),男,河南新乡人,硕士研究生,研究方向为复杂系统控制与优化(E-mail:tangzqx@163.com)。

Microgrid robust dispatch with uncertainty budget adjustment strategy based on grey entropy relation optimization

LÜ Zhilin,TANG Zeqi

(College of Electrical Engineering,Guangxi University,Nanning 530004,China)

Abstract: With the minimal operation cost,environmental cost and renewable energy fluctuations as objective,a dispatch model of microgrid is established,which takes the grey entropy relation degree as its evaluation criterion of optimal solutions. Aiming at the uncertainties of wind and photovoltaic power,uncertainty sets with predicted values as the center are constructed and the dispatch model is improved by robust optimum theory. Aiming at the problem that energy storage system easily reaches its limits in dispatch process,a strategy is proposed to estimate the uncertainty budget based on the operation state of energy storage. Examples are solved by the improved differential evolution algorithm,which adopts cloud model to increase its local search capability and chaos algorithm to improve its global search ability. The simulative results verify the feasibility of the proposed model and algorithm. The superiority of robust dispatch model is analyzed from aspects of the change of Pareto frontier and the characteristic values of optimal solution sets. The influences of uncertainty budget values in different scenarios on the dispatch of microgrid are discussed to verify that the uncertainty budget regulation strategy can effectively prevent the energy storage system from reaching its upper and lower limits,which further improves the robustness of the microgrid dispatch.

Key words: hybrid microgrid; grey entropy relation; robust dispatch; differential evolution algorithm; cloud model; chaos algorithm

(上接第37页 continued from page 37)

Three-phase decoupled power-flow algorithm based on sequence components of islanded hybrid AC/DC microgrid

CHEN Hesheng¹,WEI Zhinong¹,SHEN Haiping²,SUN Guoqiang¹,ZANG Haixiang¹,SUN Yonghui¹

(1. College of Energy and Electrical Engineering,Hohai University,Nanjing 211100,China;

2. State Grid Wuxi Power Supply Company,Wuxi 214061,China)

Abstract: For analyzing the power flow of hybrid AC/DC microgrid,the steady-state power-flow models of Droop-type DG(Distributed Generation) and grid-connected AC/DC inverter are established and the phase-sequence component conversions based on the voltage symmetry of grid-connecting point are carried out for the three-phase and single-phase grid-connection models. The sequence current compensation method is applied to decouple the AC network into three sequence networks to greatly reduce the solving scale,and the relations of coupling between AC frequency and DC voltage are constructed for both sides of AC/DC inverter to effectively maintain the power balance between two sub-networks. A three-phase decoupled power-flow algorithm suitable for different integration modes of DC network is proposed based on the sequence components of islanded hybrid AC/DC microgrid. The proposed algorithm is applied to different modified IEEE standard distribution systems,verifying its effectiveness,applicability and efficiency.

Key words: sequence component; islanded microgrid; distributed power generation; three-phase decoupling; hybrid AC/DC interlinking; power flow