

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2024.01.015

含能量路由器的交直流混合配电网潮流计算

朱一听, 吴浩宇, 张志伟, 宗晨曦, 毕恺韬, 许德智

(江南大学物联网工程学院, 江苏 无锡 214122)

摘要:能量路由器(energy router, ER)作为新兴电力电子设备,可以实现电能电力系统中的灵活分配。分析 ER 对系统的影响,研究以 ER 为配电枢纽的交直流混合配电网潮流计算方法,对实现配电网的优化运行具有重要意义。文中首先基于改进交替迭代法建立 ER 的稳态潮流模型,并对 ER 直流端口采用下垂控制策略,结合传统解耦法,提出一种适用于含 ER 的配电网交直流解耦迭代潮流计算方法。以含有多个 ER 的 IEEE 14 节点和 IEEE 69 节点配电网为算例进行仿真计算,验证所提方法的正确性与收敛性。为分析 ER 对系统运行的影响,对不同场景下 IEEE 69 节点测试系统进行仿真计算,证明 ER 在系统中可以支撑节点电压,减小系统运行损耗。

关键词:能量路由器(ER);交直流混合配电网;改进交替迭代法;解耦迭代;下垂控制;潮流计算

中图分类号: TM744

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2024)01-0136-10

0 引言

当今社会,用户对电能及其质量的需求日益提高,而传统交流配电网存在线路走廊饱和、可再生能源接入困难等问题,电力用户的用电需求难以满足^[1-3]。相比于传统的交流电力系统,直流电力系统更便于分布式电源集成,能有效降低输电损耗,且直流负荷集成换相环节较少,故障率较低,控制难度更小,可靠性更高。目前,电力系统中主要的用电负载仍是交流设备,而直流设备的并网运行会导致未来长期配电网中交直流负载混合运行的状况。交直流混合配电网具有可灵活利用交流和直流电能的优势,已成为未来新型电力系统下配电网发展的主要趋势^[4]。

为实现能源以各种形式高效地接入配电网以及灵活控制和管理新型电力系统中的电压和功率,能量路由器(energy router, ER)的概念应运而生。此概念来源于互联网中的信息路由器和交换机,其中能量流被视为信息流,通过电网中的 ER 实现电能的自由分配和传递^[5]。目前,对 ER 的研究主要集中于结构设计、暂态仿真和控制策略等方面。文献[6]提出含有模块化的多端口 ER 电路设计方法;文献[7]提出一种含有多个电压等级的 ER 交直流混合微电网模型,仿真结果验证了该模型的有效性;文献[8]提出一种 ER 的能量分层协调控制策略和无缝切换方法,使系统运行更为稳定。

研究人员针对交直流混合配电网的稳态潮流

方面开展了大量工作,但以 ER 为配电枢纽的新型电力系统在稳态建模和潮流计算方面的研究仍不多见^[9]。目前,对于求解交流配电网,传统潮流计算方法有前推回代法、Zbus 高斯法、Newton-Raphson 法以及 PQ 分解法等^[10]。但随着交直流混合配电网的迅速发展,配电网的结构以及运行方式发生了变化,传统计算方法无法适用于交直流配电网,因此,统一迭代法^[11]和交替求解法^[12]2种能够适用于交直流混合配电网的方法迅速发展。文献[13]建立了基于电压源型换流器(voltage source converter, VSC)的潮流计算模型,但并未考虑 VSC 的控制方式对电网的影响;文献[14]则未考虑 VSC 损耗对电网的干扰;文献[15]在文献[13]与文献[14]的基础上考虑 VSC 损耗,采用统一迭代法求解交直流混合配电网。文献[16]建立 ER 的潮流计算模型,为后续研究奠定基础;文献[17]考虑 ER 的控制方式,建立相应的直流配电网潮流计算方法,但是二者均只针对单一网络,未考虑交直流混联系统的情况。文献[18]提出一种基于网络矩阵的交直流混合配电网潮流计算新方法,潮流模型的求解则是基于 Newton-Raphson 法统一迭代求解,该方法能够求解含多 VSC 的配电网。

尽管统一迭代法和交替迭代法为求解交直流系统的传统方法,但交替迭代法收敛性难以保证,统一迭代法则计算量大、求解速度慢^[19],而解耦法则忽略了系统中 ER 的损耗。改进交替迭代法区别于传统交替迭代法,将交、直流电网分开迭代时的一次迭代作为完整系统的一次迭代,并在迭代过程中不断生成新的边界条件,使节点电压和功率不断更新,不会扩大误差或使系统陷入某次迭代中^[20],

收稿日期:2023-09-17;修回日期:2023-11-27

基金项目:国家自然科学基金优秀青年项目“非线性系统故障诊断与控制技术”(62222307)

如此既保证了算法的收敛性,又提高了算法的效率。文献[19]基于改进交替迭代法提出了含VSC的交直流混合网络的潮流计算方法,但使用的是二级式VSC模型,且未给出VSC的详细潮流建模和考虑VSC的交直流网络交替迭代的过程。文献[20]提出一种适用于含电压源型换流器多端直流输电系统(VSC-multi-terminal direct current system, VSC-MTDC)的交直流混联系统潮流计算方法,相比于传统交替迭代法运算,效率有所提高,但所用VSC均为二级式VSC。

目前,针对基于改进交替迭代法的含多ER交直流混合配电网潮流计算的研究不足,文中基于改进交替迭代法搭建含有ER的交直流混合配电网潮流计算模型,用于分析含多ER的交直流混联系统的潮流情况与ER对系统产生的影响。首先,建立含有多个交流端口和直流端口的通用型ER基础稳态模型,推导出ER的功率流方程,并对直流端口采用下垂控制策略;其次,结合改进交替迭代法与解耦法,提出一种利用改进交替迭代法求解含ER的交直流混合配电网潮流计算方法,既保留改进交替迭代法综合考虑ER损耗的优点,又发挥解耦法潮流运算效率高,无需考虑收敛性的优势;最后,对经过调整后的IEEE 14节点与IEEE 69节点交直流混合配电网测试系统进行算例分析,验证该算法的正确性和收敛性以及ER在系统中的调控能力。

1 ER的稳态潮流模型

图1为ER标准化三级式拓扑^[21-22]。

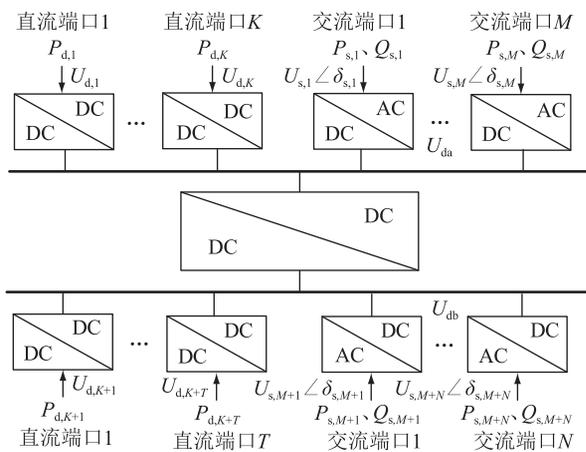


图1 ER标准化拓扑

Fig.1 Standardized topology of ERs

2条直流母线电压分别为 U_{da} 和 U_{db} ,a表示一次侧,有 K 个直流端口和 M 个交流端口;b表示二次侧,有 T 个直流端口和 N 个交流端口; P_d 、 P_s 分别为直流配电网与交流配电网注入ER直流端口与交

流端口的有功功率; Q_s 为交流配电网注入ER交流端口的无功功率; U_d 、 U_s 分别为ER与直流配电网以及交流配电网连接处电压, δ 为其相角;下标 $1, \dots, K+T$ 与 $1, \dots, M+N$ 分别为直流端口与交流端口编号。

1.1 AC/DC换流器稳态模型

图2为AC/DC换流器等效模型,由直流电容器、交流滤波器、电抗器和电桥组成,换流器全部损耗等效为电阻 R_l , X_{cl} 、 X_l 分别为交流滤波器和换流器基频等效电抗。若交流端口 l 处注入功率为 $P_{sl} + jQ_{sl}$,则交流侧电网电压为 $\dot{U}_{sl} = U_{sl} \angle \delta_{sl}$,换流器电压为 $\dot{U}_{cl} = U_{cl} \angle \delta_{sl} - \theta_l$, θ_l 为换流器电压与交流侧电网电压相角差; P_{dl} 为换流器输出有功功率; P_{cl} 为注入交流侧的有功功率; I_{dl} 为直流侧电流; U_{dl} 为直流侧电压; I_{sl} 为流过交流侧的电流。

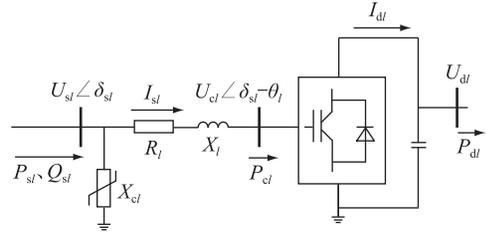


图2 AC/DC换流器等效模型

Fig.2 Equivalent model of AC/DC converter

AC/DC换流器电导 G_l 、电纳 B_l 、交流滤波器电纳 B_{cl} 可以表示为:

$$\begin{cases} G_l = R_l / (R_l^2 + X_l^2) \\ B_l = X_l / (R_l^2 + X_l^2) \\ B_{cl} = 1 / X_{cl} \end{cases} \quad (1)$$

根据基尔霍夫定律,端口处注入的有功功率 P_{sl} 和无功功率 Q_{sl} 如式(2)所示。

$$\begin{cases} P_{sl} = G_l(U_{sl}^2 - U_{sl}U_{cl}\cos\theta_l) + B_lU_{sl}U_{cl}\sin\theta_l \\ Q_{sl} = B_l(U_{sl}^2 - U_{sl}U_{cl}\cos\theta_l) - G_lU_{sl}U_{cl}\sin\theta_l + B_{cl}U_{sl}^2 \end{cases} \quad (2)$$

电力系统确定后, U_{sl} 、 G_l 、 B_{cl} 以及 B_l 为定值。

由于换流器全部损耗等效为 R_l ,因此注入交流侧的有功 P_{cl} 大小等于直流母线注入有功 P_{dl} ,可由式(3)表示。

$$\begin{cases} P_{cl} = G_l(-U_{cl}^2 + U_{sl}U_{cl}\cos\theta_l) + B_lU_{sl}U_{cl}\sin\theta_l \\ P_{dl} = P_{cl} = U_{dl}I_{dl} \end{cases} \quad (3)$$

式中:交流侧电压 $U_{cl} = \frac{\mu M}{\sqrt{2}}U_{dl}$,其中 μ 为直流侧电压的利用率,与调制手段有关,换流器调制系数 M

则取决于 μ 与脉冲宽度调制 (pulse width modulation, PWM) 的调制比。

1.2 DC/DC 变换器稳态模型

图 3 为 DC/DC 变换器稳态模型。对于直流端口 h , 一次侧电压、电流、有功与二次侧电压、电流、有功分别为 $U_{d,h}$ 、 $I_{d,h}$ 、 $P_{d,h}$ 、 $U_{dc,h}$ 、 $I_{dc,h}$ 、 $P_{con,h}$; n 为变压器变比; R_h 为变换器的全部等效损耗。

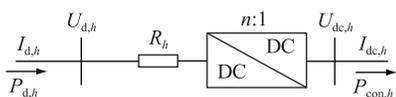


图 3 DC/DC 变换器稳态模型

Fig.3 Steady-state model of DC/DC converter

两侧电压与电流关系可以表示为:

$$\begin{cases} I_{d,h} = \frac{nU_{d,h}}{R_h} - \frac{U_{dc,h}}{R_h} \\ I_{dc,h} = nI_{d,h} = \frac{nU_{d,h}}{R_h} - \frac{n^2U_{dc,h}}{R_h} \end{cases} \quad (4)$$

两侧的有功则可以表示为:

$$\begin{cases} P_{d,h} = \frac{U_{d,h}^2}{R_h} - \frac{nU_{d,h}U_{dc,h}}{R_h} \\ P_{con,h} = \frac{nU_{d,h}U_{dc,h}}{R_h} - \frac{n^2U_{dc,h}^2}{R_h} \end{cases} \quad (5)$$

DC/DC 变换器一、二次侧的连接根据 DC/DC 变换器发挥作用的不同而不同。作为直流端口时, 一次侧连接系统外部的直流配电网, 二次侧连接内部直流母线; DC/DC 变换器起中间隔离作用时, 一、二次侧均与直流母线相连。

1.3 内部功率守恒模型

在配电网中, 多个 DC/DC 变换器与 AC/DC 换流器组成 ER 相互独立的对外接口, 一、二次侧各端口总功率均汇聚于对应侧的直流母线, 两侧母线由中间隔离 DC/DC 变换器协调连接。中间隔离 DC/DC 变换器内部功率守恒表达式为:

$$\sum_{w=1}^{M+N} P_{w,VSC} + \sum_{w=1}^{K+T} P_{w,DC/DC} - (P_{sta} + P_{dyn}) = 0 \quad (6)$$

式中: $P_{w,VSC}$ 、 $P_{w,DC/DC}$ 分别为交流、直流端口注入直流母线有功; P_{sta} 、 P_{dyn} 分别为中间隔离 DC/DC 变换器静态、动态损耗。一般 P_{sta} 为定值^[23], 而 P_{dyn} 的计算公式^[24]为:

$$\begin{aligned} P_{dyn} = & I_{da}^2 R_{Ea} + \left(\frac{I_{da} f_a}{I_{da0} f_{a0}} \right)^2 P_{wea0} + \left(\frac{I_{da}}{I_{da0}} \right)^2 \left(\frac{f_a}{f_{a0}} \right)^{0.8} P_{sea0} + \\ & I_{db}^2 R_{Eb} + \left(\frac{I_{db} f_b}{I_{db0} f_{b0}} \right)^2 P_{web0} + \left(\frac{I_{db}}{I_{db0}} \right)^2 \left(\frac{f_b}{f_{b0}} \right)^{0.8} P_{seb0} \end{aligned} \quad (7)$$

式中: f_a 、 f_b 分别为 DC/DC 变换器一次侧与二次侧工作频率; I_{da} 、 I_{db} 分别为 DC/DC 变换器一次侧与二次侧电流之和; P_{wea0} 、 P_{sea0} 分别为 DC/DC 变换器工作于 I_{da0} 和 f_{a0} 时一次侧绕组的基本基波涡流损耗和金属构件基波杂散损耗; P_{web0} 、 P_{seb0} 分别为 DC/DC 变换器工作于 I_{db0} 和 f_{b0} 时二次侧的绕组基本基波涡流损耗和金属构件基波杂散损耗; R_{Ea} 为一次侧等效电阻; R_{Eb} 为二次侧等效电阻。此处以及下文中下标 0 表示流量为设定的相关变量初始值。

1.4 ER 潮流计算模型

若在系统中存在 r 个 ER, 并将其标号, 使用 ER_{*t*} 指代第 t 个 ER。使用 PQ 控制策略控制交流端口, 下垂控制策略控制直流端口, ER 高压侧的一个交流端口设为功率平衡端口。

若 ER_{*t*} 中一次侧端口为 M_t 个, 二次侧端口为 N_t 个, 端口 l 与电网交换功率为 $P_{sl,t} + jQ_{sl,t}$, 则端口 l 功率方程为:

$$\begin{cases} \Delta P_{sl,t} = P_{sl,t} - [G_{l,t}(U_{sl,t}U_{cl,t} - U_{sl,t}U_{cl,t}\cos\theta_{l,t}) + B_{l,t}U_{sl,t}U_{cl,t}\sin\theta_{l,t}] \\ \Delta Q_{sl,t} = Q_{sl,t} - B_{l,t}(U_{sl,t}U_{sl,t} - U_{sl,t}U_{cl,t}\cos\theta_{l,t}) + G_{l,t}U_{sl,t}U_{cl,t}\sin\theta_{l,t} - B_{cl,t}U_{sl,t}U_{sl,t} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\Delta P_{sl,t}$ 、 $\Delta Q_{sl,t}$ 分别为 ER_{*t*} 中 l 端口的有功偏差量和无功偏差量; $U_{sl,t}$ 为 ER_{*t*} 中端口 l 与电网之间的电压; $U_{cl,t}$ 为端口内部交流节点电压; $\theta_{l,t}$ 为两者相角差。此处以及下文中下标 t 表示该变量为 ER_{*t*} 有关变量。

ER_{*t*} 内部功率平衡潮流方程为:

$$\begin{aligned} \Delta P_{l,t} = & U_{da} \left(\sum_{e=1}^M I_{de,VSC} + \sum_{e=1}^K I_{de,DC/DC} \right) + \\ & U_{db} \left(\sum_{f=1}^N I_{df,VSC} + \sum_{f=1}^T I_{df,DC/DC} \right) - \\ & R_{Ea} \left(\sum_{e=1}^M I_{de,VSC}^2 + \sum_{e=1}^K I_{de,DC/DC}^2 \right) - \\ & P_{sta} - R_{Eb} \left(\sum_{f=1}^N I_{df,VSC}^2 + \sum_{f=1}^T I_{df,DC/DC}^2 \right) \end{aligned} \quad (9)$$

式中: $I_{de,DC/DC}$ 为一次侧各直流端口的电流值; $I_{de,VSC}$ 为一次侧各交流端口的电流值; $I_{df,DC/DC}$ 为二次侧各直流端口的电流值; $I_{df,VSC}$ 为二次侧各交流端口的电流值。

若端口 l 电压控制系数为 m_l , 表示 AC/DC 换流器交流侧电压 U_{cl} 与直流侧电压 U_{dl} 的比值, 则完整的内部功率平衡潮流方程为:

$$\begin{aligned}
\Delta P_{l,t} &= U_{da} \sum_{l=1}^{M_l} [-G_{l,t}(m_{l,t}^2 U_{da} - \\
& m_{l,t} U_{sl,t} \cos \theta_{l,t}) + B_{l,t} m_{l,t} U_{sl,t} \sin \theta_{l,t}] + \\
U_{db} \sum_{l=1}^{N_l} [-G_{l,t}(m_{l,t}^2 U_{db} - m_{l,t} U_{sl,t} \cos \theta_{l,t}) + \\
& B_{l,t} m_{l,t} U_{sl,t} \sin \theta_{l,t}] + \\
U_{da} \sum_{h=1}^{K_l} (n_{h,t}^2 U_{da} - U_{dc,h,t}) / R_{h,t} + \\
U_{da} \sum_{h=1}^{N_l} (n_{h,t}^2 U_{da} - U_{dc,h,t}) / R_{h,t} - \\
R_{Ea,t} \left\{ \sum_{l=1}^{M_l} [-G_{l,t}(m_{l,t}^2 U_{da} - m_{l,t} U_{sl,t} \cos \theta_{l,t}) + \right. \\
& \left. B_{l,t} m_{l,t} U_{sl,t} \sin \theta_{l,t}] \right\}^2 - \\
R_{Eb,t} \left\{ \sum_{l=1}^{N_l} [-G_{l,t}(m_{l,t} k_{l,t} U_{db} - m_{l,t} U_{sl,t} \cos \theta_{l,t}) + \right. \\
& \left. B_{l,t} m_{l,t} U_{sl,t} \sin \theta_{l,t}] \right\}^2 - \\
R_{Ea,t} \left[\sum_{h=1}^{K_l} (n_{h,t}^2 U_{da} - U_{dc,h,t}) / R_{h,t} \right]^2 - \\
R_{Eb,t} \left[\sum_{h=1}^{N_l} (n_{h,t}^2 U_{da} - U_{dc,h,t}) / R_{h,t} \right]^2 - P_{sta}
\end{aligned} \quad (10)$$

2 交直流混合配电网潮流计算模型

2.1 交流配电网潮流计算方法

若交流节点数量为 g , 文中使用 Newton-Raphson 法对交流配电网各节点进行迭代计算, 迭代方程为:

$$\begin{cases} F(\mathbf{X}^{(k)}) = -\mathbf{J}\Delta\mathbf{X}^{(k)} \\ \mathbf{X}^{(k+1)} = \mathbf{X}^{(k)} + \Delta\mathbf{X}^{(k)} \end{cases} \quad (11)$$

式中: \mathbf{X} 为状态变量; $F(\mathbf{X})$ 为 n 维函数向量; $\Delta\mathbf{X}$ 为状态修正量; \mathbf{J} 为雅可比矩阵; 上标 (k) 表示第 k 次迭代过程中的变量。使用极坐标形式表示节点 i 的电压为:

$$\dot{U}_i = U_i \angle \theta_i = U_i (\cos \theta_i + j \sin \theta_i) \quad (12)$$

当交直流混合的配电网中含 ER 时系统中交流节点 i 的功率方程为:

$$\begin{cases} P_i = U_i \sum_{j=1}^g U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i = U_i \sum_{j=1}^g U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} - B_{ij} \sin \theta_{ij}) \end{cases} \quad (13)$$

式中: 平衡节点除外, P_i 、 Q_i 分别为节点 i 消耗的有

功功率与无功功率; U_i 、 U_j 分别为节点 i 、 j 的电压; G_{ij} 、 B_{ij} 分别为节点 i 、 j 之间的电导与电纳; θ_{ij} 为节点 i 、 j 之间相角之差。则节点 i 的功率偏差方程为:

$$\begin{cases} \Delta P_i = P_i - U_i \sum_{j=1}^g U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ \Delta Q_i = Q_i - U_i \sum_{j=1}^g U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} - B_{ij} \sin \theta_{ij}) \end{cases} \quad (14)$$

修正方程为:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} H & N \\ K & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U U^{-1} \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中: $\begin{bmatrix} H & N \\ K & L \end{bmatrix}$ 为功率方程的雅可比分块矩阵, 具体如式(16)所示。

$$\begin{cases} H_{ij} = \frac{\partial P_i}{\partial Q_j} = -U_i U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} - B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ H_{ii} = \frac{\partial P_i}{\partial Q_i} = -U_i \sum_{j \neq i} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} - B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ N_{ij} = U_j \frac{\partial P_i}{\partial Q_j} = -U_i U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} + B_{ij} \cos \theta_{ij}) \\ N_{ii} = U_i \frac{\partial P_i}{\partial Q_i} = -U_i \sum_{j \neq i} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} + B_{ij} \cos \theta_{ij}) \\ K_{ij} = \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_j} = U_i U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ K_{ii} = \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} = -U_i \sum_{j \neq i} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ L_{ij} = U_j \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_j} = U_i U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ L_{ii} = U_i \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} = -U_i \sum_{j \neq i} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - \\ B_{ij} \cos \theta_{ij}) + 2U_i^2 B_{ij} \end{cases} \quad (16)$$

2.2 直流配电网潮流计算方法

设直流配电网的节点数为 n , 对于直流配电网, 其潮流方程可以用式(17)表示。

$$P_{dc,i} = p U_{dc,i} \sum_{j=1}^n G_{dc,ij} U_{dc,j} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (17)$$

式中: $P_{dc,i}$ 为提前设定的节点 i 的功率值; p 为直流配电网级数; $G_{dc,ij}$ 为电导矩阵中第 i 行 j 列的元素; $U_{dc,i}$ 、 $U_{dc,j}$ 分别为节点 i 、 j 的电压。

在潮流方程中存在功率与电压 2 个变量, 需要先解出其中一个变量。

设节点 1 到节点 h 为 P 节点, 节点 $h+1$ 到节点 $m=n-1$ 为下垂节点, 节点 n 为松弛节点, 则可以推导出 P 节点潮流方程, 即式(18)。

$$\Delta P_{dc,i} = P_{dc,i} - pU_{dc,i} \sum_{j=1}^n G_{dc,ij} U_{dc,j} = 0$$

$$i = 1, 2, \dots, h \quad (18)$$

式中： $\Delta P_{dc,i}$ 为系统中直流配电网节点 i 的功率偏差。

令 $\beta_{dp,i}$ 为下垂节点在配电网中的计算量，则可得式(19)。

$$P_{dc,i,ref} + P_{DG,i} - \beta_{dp,i} = P_{dc,i,ref} + P_{DG,i} - P_{ld,i} - \frac{1}{k_{dp,i}} U_{dc,i,ref} \quad (19)$$

式中： $P_{DG,i}$ 为与直流配电网节点 i 所连的分布式电源注入功率值； $P_{ld,i}$ 为节点 i 的负荷值。由式(19)可知，只要给定 $P_{dc,i,ref}$ 与 $U_{dc,i,ref}$ ，就可以确定 $\beta_{dp,i}$ ，可得下垂节点即节点 $h+1$ 到节点 m 的潮流方程，如式(20)所示。

$$\Delta \beta_{dp,i} = \beta_{dp,i} - pU_{dc,i} \sum_{j=1}^n G_{dc,ij} U_{dc,j} - \frac{1}{k_{dp,i}} U_{dc,i} = 0 \quad i = h + 1, \dots, m \quad (20)$$

因此，直流配电网的潮流计算方程由式(17)与式(19)构成，再使用 Newton-Raphson 法对直流配电网进行迭代计算，图4为潮流迭代计算流程。

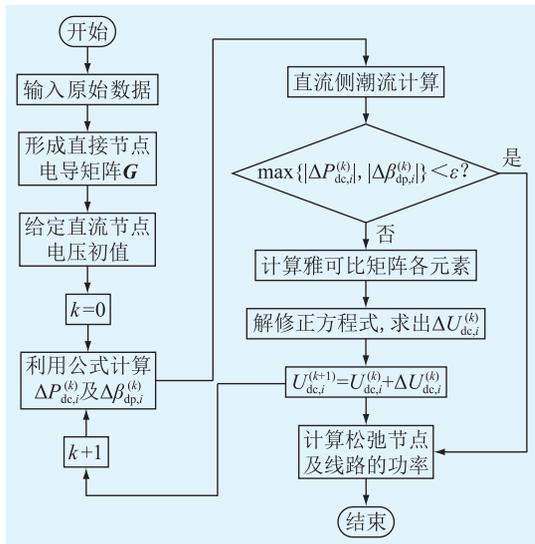


图4 直流配电网潮流计算流程

Fig.4 Power flow calculation process of DC distribution network

2.3 ER 潮流计算方法

使用 Newton-Raphson 法迭代求解 ER_l 的功率方程，则其迭代公式为：

$$\begin{cases} \Delta \mathbf{F}_l = \mathbf{J}_l \Delta \mathbf{X}_l = [\Delta P_{s,1,t} \ \dots \ \Delta P_{s,M_l+N_l-1,t} \\ \Delta Q_{s,1,t} \ \dots \ \Delta Q_{s,M_l+N_l,t} \ \Delta P_{L,t}] \\ \Delta \mathbf{X}_l = [m_{1,t} \ \dots \ m_{M_l+N_l,t} \ \theta_{1,t} \ \dots \ \theta_{M_l+N_l,t}] \end{cases} \quad (21)$$

式中： $\Delta \mathbf{F}_l$ 为偏差； $\Delta \mathbf{X}_l$ 为 ER_l 功率流方程组的变量； $\Delta P_{s,1,t}$ 、 $\Delta Q_{s,1,t}$ 、 $m_{1,t}$ 、 $\theta_{1,t}$ 分别为 ER_l 中与交流节点 1 相连处的有功偏差、无功偏差、电压控制系数与电压相角；雅可比矩阵 \mathbf{J}_l 可由式(22)表示。

$$\mathbf{J}_l = \begin{bmatrix} \frac{\partial(\Delta P_{s,t})}{\partial m_t} & \frac{\partial(\Delta P_{s,t})}{\partial \theta_t} \\ \frac{\partial(\Delta Q_{s,t})}{\partial m_t} & \frac{\partial(\Delta Q_{s,t})}{\partial \theta_t} \\ \frac{\partial(\Delta P_{L,t})}{\partial m_t} & \frac{\partial(\Delta P_{L,t})}{\partial \theta_t} \end{bmatrix} \quad (22)$$

3 含 ER 的交直流混合配电网潮流计算方法

文中综合考虑交替迭代法以及解耦法 2 种传统方法的优势，对传统方法进行改进，基于改进交替迭代法分析含 ER 的交直流混合配电网潮流。交直流解耦求解法是改进自交替迭代法的潮流计算求解方法，将功率控制节点作为并网节点，利用 VSC 端口的预先假设条件实现系统的解耦，计算速度快，较交替迭代法而言消去了交接误差的干扰，收敛性好，但不足之处是假设条件未能考虑 VSC 损耗的影响^[25]，迭代解出的并网节点变量的计算值与实际值相差较大。文中依托 ER 稳态模型，改进交直流解耦求解法，迭代求解 ER 以及交流配电网潮流，既保留改进交替迭代法综合考虑 ER 损耗的优点，又发挥解耦法潮流运算效率高、无须考虑收敛性的优势。

潮流计算步骤如下：

(1) 输入支路、节点、负荷功率及 ER 参数等系统数据，划分直流及交流系统，并对直流节点及交流节点编号，规定功率正方向为注入 ER 方向。

(2) 除松弛端口外，ER 其余直流端口和交流端口分别使用下垂控制与 PQ 控制，并设置直流端口参数 $P_{dc,ref}$ 、 k_{dp} 以及交流端口参数 P_s 、 Q_s 。

(3) 根据步骤(2)中所设置直流端口参数以及式(7)、式(17)一式(20)计算直流电网潮流。

(4) 使用其他端口的给定有功功率初始化松弛端口有功，如式(23)所示，并设置 ER 交流端口参数如式(24)、式(25)所示。

$$P_{s,M_l+N_l,t} = - \sum_{l=1}^{M_l+N_l-1} P_{s,l,t} - \sum_{h=1}^{K_l+T_l} P_{dc,h,t} \quad (23)$$

$$\theta_{l,0,t} = \arctan(P_{sl,t} / (U_{sl,t} U_{sl,t} / X_{l,t} + U_{sl,t} U_{sl,t} / X_{c,t} - Q_{sl,t})) \quad (24)$$

$$k_{l,0,t} = P_{sl,t} X_{l,t} / (U_{sl,t} U_{d,t} \sin \theta_{l,0,t}) \quad (25)$$

(5) 若交流电网节点 i 与 ER_l 中端口 l 相连，则可将节点 i 输出功率等效为原功率与端口 l 交换功

率之和,即式(26)所示,并使用 Newton-Raphson 法计算交流电网潮流,更新节点输出功率与电压。

$$\begin{cases} P_s = P_i + P_{sl,t} \\ Q_s = Q_i + Q_{sl,t} \end{cases} \quad (26)$$

(6) 根据式(21)、式(22)计算 ER_i 交流端口功率,计算并更新 ER_i 交流端口变量 $\theta_{l,t}$ 、 $k_{l,t}$ 以及松弛端口有功功率 $P_{s,M_1+N_1,t}^{new}$ 。

(7) 计算此次迭代完成时注入 ER 松弛端口有功的变化,如果变化足够小,如式(27)所示,说明注入有功基本稳定,则停止迭代并输出结果,否则返回步骤(5)。

$$\max \left\{ \left| P_{s,M_1+N_1,1}^{new} - P_{s,M_1+N_1,1} \right|, \dots, \left| P_{s,M_1+N_1,t}^{new} - P_{s,M_1+N_1,t} \right|, \dots, \left| P_{s,M_1+N_1,r}^{new} - P_{s,M_1+N_1,r} \right| \right\} < \varepsilon \quad (27)$$

潮流计算具体流程如图5所示。首先输入包括节点、支路、ER参数等原始数据对配电网进行分区以及节点编号,并设定 ER 的控制策略以及迭代初值;然后对含下垂节点的直流配电网进行潮流计算;接着初始化平衡端口有功和交流端口参数,进行交流配电网潮流计算;最后对 ER 各个交流端口进行功率计算,若不满足迭代精度则再次进行交流配电网潮流计算,直到满足精度要求。

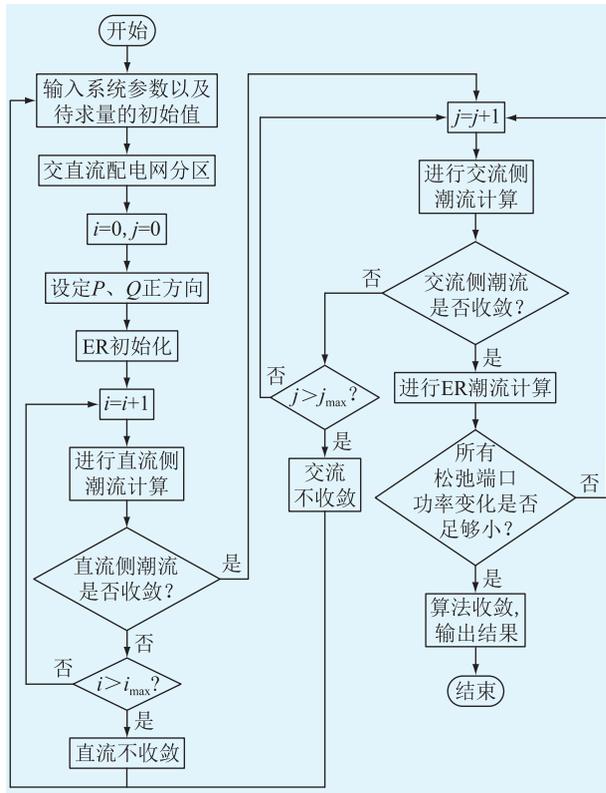


图5 含 ER 的交直流配电网新潮流计算流程

Fig.5 Flowchart of new power flow calculation of AC/DC distribution network with ERs

4 算例分析

为了验证所提出的适用于含 ER 的交直流配电网解耦迭代潮流计算方法的准确性与收敛性,文中在标准 IEEE 14 节点和 IEEE 69 节点测试系统的基础上进行相应调整^[26],形成测试算例。

4.1 IEEE 14 节点系统算例

对改进 IEEE 14 节点系统进行了验证分析,算例如图6所示。设定收敛精度为 1×10^{-4} p.u., U_{d1} 为 2.1 p.u., U_{d2} 为 1.9 p.u.。2 个 ER 的容量均设置为 50 MW,各个端口阻抗参数 R 为 0.001 8 p.u., X 为 0.036 3 p.u., X_c 为 $-7.261 7$ p.u.,系统的基准功率为 100 MV·A。

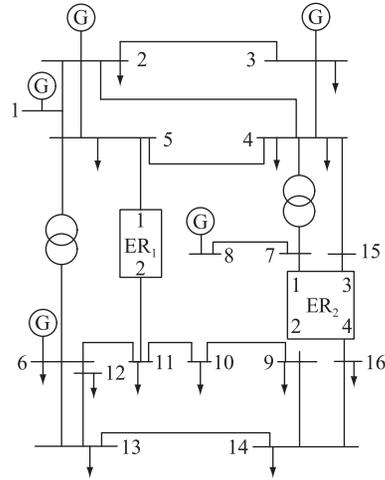


图6 含 ER 的 IEEE 14 节点网络拓扑

Fig.6 IEEE 14-node network topology with ERs

经文中提出的潮流计算新方法进行仿真求解,结果如表1和表2所示。系统经迭代计算,运行时间为 0.21 s,交流网络采用 Newton-Raphson 法,迭代次数为 4 次,算例中 2 个 ER 平衡端口 $P_{s,M_1+N_1}^1$ 、 $P_{s,M_2+N_2}^2$ 的初值分别为 -0.35 p.u.和 -0.30 p.u.,更新次数为 3 次。最后一次迭代中, $|P_{s,M_1+N_1,1}^{new} - P_{s,M_1+N_1,1}^1|$ 、 $|P_{s,M_2+N_2,2}^{new} - P_{s,M_2+N_2,2}^2|$ 的最大值小于 1×10^{-6} p.u.,平衡端口 $P_{s,M_1+N_1,1}^{new}$ 和 $P_{s,M_2+N_2,2}^{new}$ 的值分别保持 -0.28 p.u.和 -0.33 p.u.不变,交替迭代过程结束,由此可见文中所提出的算法正确可行,灵活有效。

表1 ER_1 的计算结果

Table 1 The calculation result of ER_1

端口	$P_s /$ p.u.	$Q_s /$ p.u.	$U_s /$ p.u.	k	$\theta /$ ($^\circ$)	$U_d /$ p.u.
1	0.30	-0.08	1.021 3	0.485 0	0.593 5	2.1
2	-0.28	-0.05	1.077 5	0.511 6	-0.521 4	2.1

表 2 ER₂ 的计算结果
Table 2 The calculation results ER₂

端口	$P_s /$ p.u.	$Q_s /$ p.u.	$U_s /$ p.u.	k	$\theta /$ ($^\circ$)	$U_d /$ p.u.
1	0.30	0.10	1.059 4	0.552 7	0.537 3	1.9
2	0.50	0.10	1.061 7	0.553 8	0.907 4	1.9
3	-0.45	-0.05	1.049 1	0.550 8	-0.862 1	1.9
4	-0.33	-0.05	1.090 9	0.572 5	-0.594 9	1.9

4.2 IEEE 69 节点系统算例

4.2.1 IEEE 69 节点算例模型与参数

如图 7 所示,调整后的 IEEE 69 节点测试系统包括 10 kV 与 380 V 的交流配电网以及 10 kV 与 750 V 的直流配电网。

在图 7 系统中,设定收敛精度为 1×10^{-4} p.u., U_d 为 1.5 p.u.,平衡节点设置为 10 kV 直流电网的节点 13,750 V 直流电网的节点 11 和 380 V 交流电网的节点 11,松弛节点为 3 个 ER 的端口 4。

4.2.2 潮流仿真与分析

调整过的 IEEE 69 节点测试系统经文中提出的潮流计算新方法进行仿真求解,结果如表 3 所示。程序运行时间为 0.16 s,3 个松弛端口的初值 $P_{s,M_1+N_1,1}$ 、 $P_{s,M_2+N_2,2}$ 和 $P_{s,M_3+N_3,3}$ 分别被设定为 0.770 1 p.u.、-0.050 0 p.u.以及 0.100 2 p.u.,迭代 11 次后结束。最后一次迭代时, $|P_{s,M_1+N_1,1}^{new} - P_{s,M_1+N_1,1}|$ 、 $|P_{s,M_2+N_2,2}^{new} - P_{s,M_2+N_2,2}|$ 与 $|P_{s,M_3+N_3,3}^{new} - P_{s,M_3+N_3,3}|$ 均小于 1×10^{-4} p.u.,松弛端口参数更新时, $P_{s,M_1+N_1,1}^{new}$ 、 $P_{s,M_2+N_2,2}^{new}$ 和 $P_{s,M_3+N_3,3}^{new}$ 分别为 0.775 3 p.u.、-0.067 5 p.u.和 0.105 2 p.u.,数值恒定不变。图 8 为交流配电网与 ER 之间收敛误差的变化。

将使用文中提出方法计算出的结果与使用 MATPOWER 求解出的结果进行对比,两者计算出的交流配电网的潮流结果中所有节点的计算误差

均小于 1%,直流配电网则均小于 0.6%。对比可知,文中提出的用于含 ER 的交直流混合配电网的潮流计算方法准确性更高。

4.2.3 ER 对系统潮流的影响

在验证算法准确性的基础上,设置 4 种场景分析 ER 在交直流混合配电网中对系统潮流的影响,场景的设置如下所示。

场景 1:在 4.2.1 节算例基础上不做任何改动,作为对照组。

场景 2:场景 1 的基础上,使用下垂控制作为 ER 的直流端口的控制方式。

场景 3:场景 1 基础上,直流端口使用 P 控制方式,改变交流端口控制系数。

场景 4:场景 1 基础上,直流端口使用下垂控制方式,改变交流端口控制系数。

IEEE 69 节点测试系统在 4 种不同场景下的网络损耗如表 4 所示。

由表 4 可知,4 个场景下 ER 的损耗相差不大;场景 2 中的直流配电网损耗与场景 1 相比降低了 0.007 4 MW,场景 4 中的直流配电网损耗同样比场景 3 低了 0.007 4 MW,由此可知 ER 的直流端口采用下垂控制可以有效降低直流网络的损耗;场景 3 中的交流配电网损耗与场景 1 对比降低了 0.036 3 MW,场景 4 的交流配电网损耗与场景 2 相比降低了 0.036 4 MW,说明改善 ER 交流端口的控制系数能有效降低交流配电网的网络损耗。通过对比 4 个场景下的总损耗可知:改变 ER 直流端口的控制方式和交流端口的控制参数,可以有效降低系统的总损耗。

图 9 与图 10 分别为 10 kV 与 750 V 直流配电网的潮流计算结果。从图 9 中可以看出,场景 2 节点电压值大于场景 1,场景 4 节点电压值大于场景

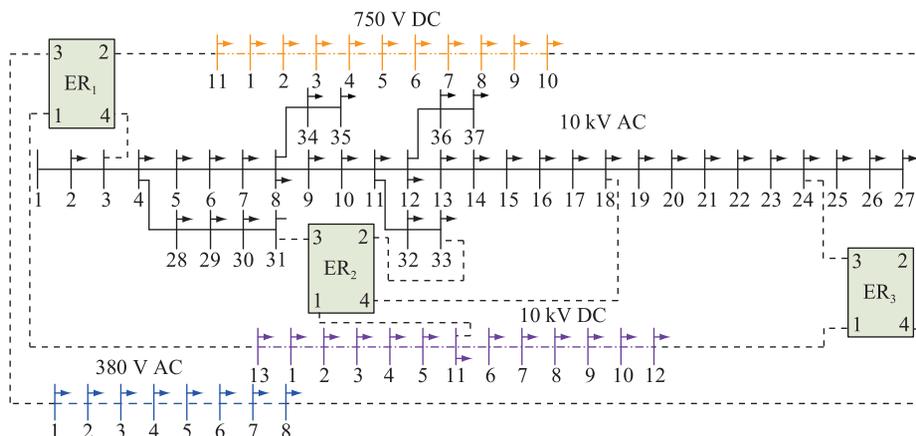


图 7 IEEE 69 节点测试系统
Fig.7 IEEE 69-node test system

表 3 ER 潮流计算结果

Table 3 Calculation results of power flow of ERs

ER 编号	端口	控制方式	P_s / p.u.	Q_s / p.u.	U_s / p.u.	m	θ / ($^\circ$)
1	1	定直流电压控制	-0.619 0	0	1.000 0		
		定直流电压控制	-0.035 2	0	1.000 0		
	3	定交流电压控制	-0.116 1	0	1.000 0		
		松弛端口	0.775 3	0	0.999 9		
2	1	P 控制	-0.100 0	0	0.987 2		
	2	PQ 控制	-0.500 0	-0.100 0	0.968 4	0.645 2	1.192 2
	3	PQ 控制	-0.450 0	-0.100 0	1.001 2	0.678 1	-0.362 9
	4	松弛端口	-0.067 5	-0.100 1	0.956 5	0.644 6	0.297 8
3	1	P 控制	-0.100 1	0	0.980 1		
	2	P 控制	-0.010 1	0	0.988 9		
	3	PQ 控制	0.010 0	0.010 0	0.942 5	0.657 9	0.426 3
	4	松弛端口	0.105 2	0	0.955 0	0.632 5	0.137 9

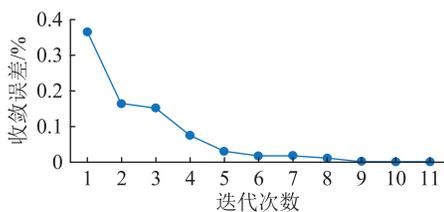


图 8 迭代收敛误差

Fig.8 Iterative convergence error

表 4 IEEE 69 节点测试系统的功率损耗

Table 4 Power loss of IEEE 69-node test system

场景	ER/MW	直流部分/MW	交流部分/MW	总损耗/MW
场景 1	0.027 5	0.009 2	0.075 6	0.112 3
场景 2	0.027 5	0.001 8	0.075 6	0.104 9
场景 3	0.027 4	0.009 2	0.039 3	0.075 9
场景 4	0.027 4	0.001 8	0.039 2	0.068 4

3,这是因为在场景 2、4 中,ER₂、ER₃的端口 1 采用下垂控制。在迭代过程中,当直流网络电压下降时,采用下垂控制的端口 1 会被迫输出更多的功率来支撑节点电压。结合图 10 可以进一步证明直流端口的控制策略会影响系统直流部分的潮流分布,

采用下垂控制可以支撑直流节点电压。

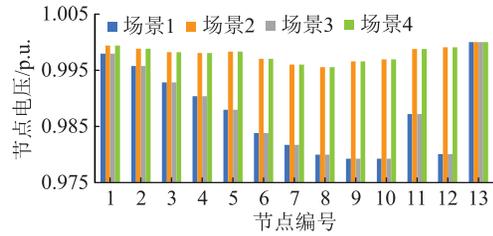


图 9 10 kV 直流配电网计算结果

Fig.9 Calculation results of 10 kV DC grid

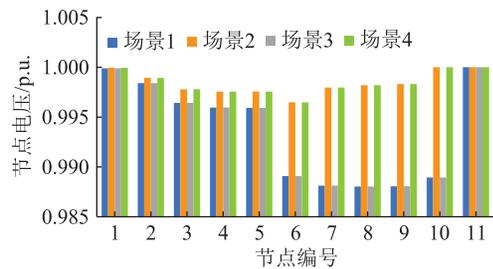


图 10 750 V 直流配电网计算结果

Fig.10 Calculation results of 750 V DC grid

图 11 与图 12 分别为 10 kV 与 380 V 交流配电网的潮流计算结果。图 11 中场景 1 和 2、3 和 4 的节点电压都近似相等,说明下垂控制对交流配电网电压几乎没有影响。图 12 为了显示对比,保持场景 3、4 中 ER₃端口 3 输出有功不变,均为 0.01 MW,输出无功场景 3 中为 0.01 Mvar,场景 4 中为 0.02 Mvar,可以看出交流电网电压明显增加。图 11 与图 12 证明了通过改变 ER 交流端口的控制功率,就可以改变交流配电网的潮流方向。

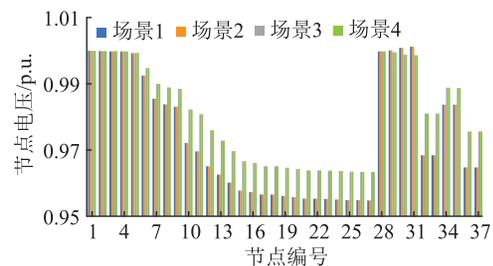


图 11 10 kV 交流配电网计算结果

Fig.11 Calculation results of 10 kV AC grid

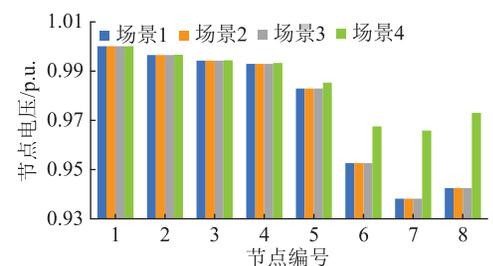


图 12 380 V 交流配电网计算结果

Fig.12 Calculation results of 380 V AC grid

通过各种场景仿真分析,证明 ER 可以对交直流混合配电网的经济性和安全性方面产生积极作用,其除松弛节点外的直流端口采用下垂控制能够增强 ER 对节点电压的支撑作用;改变 ER 的相应控制参数以及控制方式,能够改变 ER 对节点电压的支撑,减小运行损耗,适用于更多场景。

5 结语

文中基于改进交替迭代法和解耦法提出了一种适用于含有 ER 的交直流混合配电网潮流计算新方法。基于改进交替迭代法建立了 ER 稳态潮流模型,选择交流配电网、直流配电网与 ER 潮流计算方法,建立了交直流混合配电网潮流计算数学模型。通过调整的 IEEE 14 节点与 IEEE 69 节点测试系统为算例验证所提潮流计算方法的收敛性,并与 MATPOWER 计算结果相比较,证明了文中方法的正确性。通过对不同场景下含 ER 交直流混合配电网计算结果证明 ER 对节点电压的支撑作用,ER 可减小运行损耗、改善系统运行,适用于多种场景。在后续研究中,为了更好地利用 ER 潮流管控的优势,可以通过优化 ER 端口的控制参数来优化交直流混合配电网的运行状况。

参考文献:

[1] 王加澍. 交直流混合多端口电能路由拓扑与控制研究[D]. 南京:南京师范大学,2021.
WANG Jiashu. Research on topology and control of AC-DC hybrid multi-port power router[D]. Nanjing:Nanjing Normal University,2021.

[2] 胡鹏飞,朱乃璇,江道灼,等. 柔性互联智能配电网关键技术研究进展与展望[J]. 电力系统自动化,2021,45(8):2-12.
HU Pengfei, ZHU Naixuan, JIANG Daozhuo, et al. Research progress and prospects of key technologies of flexible interconnected smart distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems,2021,45(8):2-12.

[3] 熊月清,李峰,徐鹏,等. 基于混合换流器的多端交直流系统潮流计算[J]. 电力工程技术,2020,39(1):64-70.
XIONG Yueqing, LI Feng, XU Peng, et al. Power flow calculation of multi terminal AC/DC system based on hybrid converter[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(1): 64-70.

[4] PAUL S, SHARMA A, PADHY N P. Risk constrained energy efficient optimal operation of a converter governed AC/DC hybrid distribution network with distributed energy resources and volt-VAR controlling devices[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(4): 4263-4277.

[5] XIA M C, CHEN M F, CHEN Q F. Rule-based energy buffer strategy of energy router considering efficiency optimization[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 125: 106378.

[6] LIU B, PENG Y W, XU J C, et al. Design and implementation of multiport energy routers toward future energy Internet[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(3): 1945-1957.

[7] LIU B Q, CHEN J W, ZHU Y X, et al. Distributed control strategy of a microgrid community with an energy router[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(17): 4009-4015.

[8] WANG Y A, HUANG J S. Coordinated control method for AC/DC distribution network based on four-port energy router[J]. American Journal of Electrical and Electronic Engineering, 2020, 8: 60-67.

[9] 李亚辉,李扬,李国庆. 基于协同多目标粒子群优化的交直流系统最优潮流[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(4): 94-100, 138.
LI Yahui, LI Yang, LI Guoqing. Optimal power flow for AC/DC system based on cooperative multi-objective particle swarm optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(4): 94-100, 138.

[10] 廖小兵,刘开培,乐健,等. 电力系统区间潮流计算方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(2): 447-458, 642.
LIAO Xiaobing, LIU Kaipei, LE Jian, et al. Review on interval power flow calculation methods in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(2): 447-458, 642.

[11] 王成山. 微电网分析与仿真理论[M]. 北京:科学出版社,2013.
WANG Chengshan. Analysis and simulation theory of micro-grids[M]. Beijing:Science Press, 2013.

[12] BARADAR M, CHANDHARI 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.

[13] AHMED H M A, ELTANTAWY A B, SALAMA M M A. A generalized approach to the load flow analysis of AC-DC hybrid distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(2): 2117-2127.

[14] ZHANG X Y, HAN X S, YANG M, et al. A novel power flow algorithm for hybrid AC/DC power grids[J]. Electric Power Components and Systems, 2017, 45(14): 1607-1616.

[15] YANG G K, DONG P, LIU M B, et al. Research on random fuzzy power flow calculation of AC/DC hybrid distribution network based on unified iterative method[J]. IET Renewable Power Generation, 2021, 15(4): 731-745.

[16] MIAO J Q, ZHANG N, KANG C Q, et al. Steady-state power flow model of energy router embedded AC network and its application in optimizing power system operation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 4828-4837.

[17] 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 System Technology, 2016, 40(3): 712-718.

[18] 金国彬,石超,李国庆,等. 基于网络矩阵的交直流混合配

- 电网潮流计算[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(24): 52-61.
- JIN Guobin, SHI Chao, LI Guoqing, et al. Power flow calculation of an AC-DC hybrid distribution network based on a network matrix[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(24): 52-61.
- [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] 周涛, 陈中, 戴中坚, 等. 含 VSC-MTDC 的交直流系统潮流算法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(11): 3140-3149.
- ZHOU Tao, CHEN Zhong, DAI Zhongjian, et al. An AC/DC-system power flow algorithm with VSC-MTDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(11): 3140-3149.
- [21] 张露青, 陈爱康, 顾玖, 等. 基于多能源网络路由算法的区域能源广域网协同规划[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(23): 7499-7511.
- ZHANG Luqing, CHEN Aikang, GU Jiu, et al. Regional energy wide area network planning based on routing algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(23): 7499-7511.
- [22] XU Y, ZHANG J H, WANG W Y, et al. Energy router: architectures and functionalities toward energy Internet[C]//2011 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm). Brussels. IEEE, 2011: 31-36.
- [23] LIU G Y, CHEN X H, WANG J J, et al. An optimal design approach on energy storage elements of DC/DC converters via matching principles[J]. IET Renewable Power Generation, 2021, 15(16): 3927-3940.
- [24] WANG J M, JING C Y, GUO Q L, et al. Separate test and analysis of load loss components for HV DC converter transformer[C]//2008 International Conference on High Voltage Engineering and Application. Chongqing, China. IEEE, 2009: 457-460.
- [25] 张朝学, 邹晓松, 袁旭峰, 等. 基于 VSC 的柔性互联网潮流解耦算法研究[J]. 电测与仪表, 2019, 56(19): 13-18.
- ZHANG Chaoxue, ZOU Xiaosong, YUAN Xufeng, et al. Research on power flow decoupling algorithm for flexible interconnected power grid based on VSC[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(19): 13-18.
- [26] BACH K Q. A novel method for global voltage sag compensation in IEEE 69 bus distribution system by dynamic voltage restorers[J]. Thermal science and engineering progress, 2019, 14(8): 1893-1911.

作者简介:



朱一昕

朱一昕(1987),男,博士,副教授,研究方向为智能电网与功率均分策略研究(E-mail: zhuyixin1987@163.com);

吴浩宇(1999),男,硕士在读,研究方向为电力系统潮流计算与功率均分;

张志伟(1997),男,硕士在读,研究方向为电力系统不确定潮流与优化。

Power flow calculation of AC-DC hybrid distribution network with energy routers

ZHU Yixin, WU Haoyu, ZHANG Zhiwei, ZONG Chenxi, BI Kaitao, XU Dezhi

(School of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: As a new power electronic equipment, energy routers (ERs) can realize the flexible distribution of electric energy in power systems. It is of great significance to analyze the influence of energy routers on the system and study the power flow calculation methods of AC-DC hybrid distribution networks with ERs as the distribution hub. In this paper, the steady state power flow model of ERs is established based on the improved alternating iteration method, and the droop control strategy is adopted for the DC port of the ERs. Combined with the traditional decoupling method, an AC-DC decoupling iterative power flow calculation method suitable for the power distribution network containing ERs is proposed. An IEEE 14-node and IEEE 69-node system with multiple ERs are used as examples to verify the correctness and convergence of the proposed method. In order to analyze the influence of ERs on the system operation, the simulation calculation of IEEE 69-node test system in different scenarios proves that ERs can support the node voltage in the system and reduce the system operation loss.

Keywords: energy router (ER); AC-DC hybrid distribution networks; improved alternate iteration method; decoupling iteration; droop control; power flow calculation

(编辑 钱悦)