

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200913

## 交直流电力网络源流电能分配关系解析

于继来<sup>1</sup>, 张婷<sup>1</sup>, 郭钰锋<sup>1</sup>, 盛玉和<sup>2</sup>, 张伟<sup>1</sup>, 王松岩<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 国网黑龙江省电力有限公司电力科学研究院, 黑龙江 哈尔滨 150030)

**摘要:** 瞬时值解析方式虽更易于厘清电气源流间的瞬时分配关系, 但若将其直接应用于分析大型交直流电网源流电能分配关系(EDR), 则仍存在计算量大、与常用关口式电能计量模式不兼容的问题。为此, 提出了一种解析 EDR 的方法。推导了关于交流支路源-流对的瞬时电流和功率及周期电能分配关系式, 提出了计算直达能量成分及其能耗的方法, 并采用等效虚拟交流化的方式将其拓展应用于直流支路源-流对。在此基础上, 提出了能够计算任一网络源-流对所有关联路径链的 EDR 正反向追踪算法。算例表明, 该方法能够计算全网级的 EDR, 可为研发智能电网能流和非能流综合分析与核算系统提供技术支撑。

**关键词:** 交直流电力网络; 源流; 能量追踪; 瞬时值; 分摊

### Analysis of energy distribution relationship of a source-flow pair in an AC/DC power network

YU Jilai<sup>1</sup>, ZHANG Ting<sup>1</sup>, GUO Yufeng<sup>1</sup>, SHENG Yuhe<sup>2</sup>, ZHANG Wei<sup>1</sup>, WANG Songyan<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Electric Power Research Institute of State Grid Heilongjiang Electric Power Company Limited, Harbin 150030, China)

**Abstract:** Although the instantaneous value analysis method makes it easier to clarify the instantaneous current and power distribution relationships between electrical sources and flows, if it is directly applied to analyze the source-flow Energy Distribution Relationship (EDR) of a large AC/DC power grid, there remain problems such as a large amount of calculation and incompatibility with common gateway energy metering modes. Therefore, a new method of analyzing EDR is proposed. For AC branch source-flow pairs, the distribution relationships of instantaneous current, instantaneous power and periodic energy are derived, and a method for calculating through-energy components and energy loss is proposed. This method is extended to DC branch source-flow pairs with virtual AC technology. Forward and backward tracking algorithms of EDR for all associated path chains of any network source-flow pair are proposed. The cases show that the method can calculate the grid-level EDRs, and provide theoretical support to further develop an integrated analysis system of energy-flow and non-energy flow for a smart grid.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. SGTYHT/18-JS-206).

**Key words:** AC/DC power network; source and flow; energy track; instantaneous value; allocation

## 0 引言

交直流电力网络是承载各类电源和负荷间电能输配功能的重要载体。为服务于电能计费与成本核算, 普遍在各类电源和负荷接网点、重要输配电通道送受端、不同电压等级或交直流系统变换点处, 安装关口电能表。受目前计量原理所限, 此类表普

遍只能测量进出关口的总电能, 尚无法直接测量多个网络源流同时进出某一交流关口时在总电能中的成分信息, 以及源流间的能量穿越<sup>[1-2]</sup>情况(属单一关口点内的穿越), 也无法测量不同关口的电源和负荷间的能量供求信息, 以及可能存在的能量穿越情况(属多关口点间的穿越), 更无法做到纯直流电力可借助超级电力包技术精准分配负载之需<sup>[3]</sup>。此状况严重制约着与能流关系解析相关的成本核算问题的进一步厘清与公正解决<sup>[4-9]</sup>。

基金项目: 国家电网公司科技项目资助(SGTYHT/18-JS-206)

理论上,有许多文献从相量体系的角度探讨电力网络不同电源和负荷间的功率供求(含功耗分摊)问题。如文献[10-14]基于节点比例共享原则,采用电流<sup>[10-12]</sup>和功率<sup>[13-14]</sup>追踪或分解方式分析电源功率流向问题;文献[15-17]基于叠加定理、投影原理等,分析功率供求中的线损分布与分摊问题;文献[7,18-20]主要结合有功功率(相量体系的周期平均功率)和无功功率等进行数学分析,探讨了计算电源与负荷间功率分布、损耗分摊额的函数贡献值方法;文献[21]探讨了基于网损贡献率分摊分布式电源接入后的增量损耗问题。另外,文献[22-23]从节点-支路联合电气剖分角度,探讨了功率分配关系和支路损耗分摊问题,并从支路均匀剖分角度发现同一节点上的电源或负荷间存在一定量的有功和无功交换现象。与该交换对应的能量是否属于穿越性质?与真正的穿越能量间存在多大偏差?这些问题有待深入探讨和厘清。

尽管众多学者基于相量体系进行了多年探索,然而,此类方法因存在有功无功非线性耦合等问题,迄今尚未取得理论共识<sup>[14,17,22-24]</sup>。

针对相量体系研究现状,文献[25]提出瞬时值解析思路并指出:直接由瞬时值分析源流电气关系,不再出现数学形式的有功无功非线性耦合现象。文献[26]将此思路拓展至交流电网级源流电气关系解析,并重点分析了常规电源和负荷的源-荷二重性,证明了节点瞬时电流比例共享定理的成立性,检验了网络级瞬时电流正反向追踪结果的一致性。文献[27]构建了阻抗支路-受端负荷能量分配关系总图,并分析了单一关口点的能量穿越和交叉补贴问题。如何将上述思路进一步实用化升级,以适应大型交直流电网源流 EDR 计算、费用核算<sup>[5,7,8,14]</sup>、碳补偿<sup>[28]</sup>和关键控制决策<sup>[23]</sup>等问题更为公正或精准解决的需要,尚需在以下方面取得突破。

1) 已有计算全网 EDR 的方法,需先计算网级瞬时电流和功率关系。此暂难完全兼容常用关口式电能计量模式。如若为此大面积改造现有电能表安装方案和计量模式,显然不可取。因此,需要在继承瞬时值解析优点的同时,探讨兼容现有计量模式的实用方法。

2) 针对同一节点或支路这类单一关口解析的 EDR,虽有利于澄清部分理论问题,但需将解析对象拓展至任意多个节点、多个支路(包括交直流线路和变压器)及其相连的源流,才能胜任实际电网多关口点 EDR 解析的需要。

3) 已分析的能量分配和穿越关系,尚未涉及跨关口的任一网络源-流对间的直达能量成分及其能

耗分布信息。在实际电网中,除直供线路外,大多数为带分支的进出线,这可能导致在某网络源-流对的电能传输路径链中途汇入其他源流能量成分,或部分成分流向他处。如何计算任一网络源-流对沿关联路径链传输的直达能量成分,属于有待突破的关键问题。

因此,本文将针对上述问题提出解决对策,以助推相关成果尽早实用化。

## 1 交流支路送受端源流组对问题

图 1 为送端节点  $s$  带  $m$  个源,受端节点  $r$  带  $n$  个流的三相对称交流支路  $\Pi$  型等值电路的单线图。 $Z = R + jX$ 、 $Y_s = G_s + jB_s$  和  $Y_r = G_r + jB_r$  分别为支路阻抗和接地导纳; $u_s(t)$  和  $u_r(t)$  分别为节点  $s$  和  $r$  的瞬时电压; $i_s(t)$  和  $i_r(t)$  分别为  $s$  和  $r$  端的支路瞬时电流; $i_{si}(t)$  和  $i_{rj}(t)$  分别为  $s$  端源  $i$  和  $r$  端流  $j$  瞬时电流。在标幺制下,各瞬时值为

$$\begin{cases} u_s(t) = \sqrt{2}U_s \sin(\omega t + \varphi_s) \\ u_r(t) = \sqrt{2}U_r \sin(\omega t + \varphi_r) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} i_s(t) = \sqrt{2}I_s \sin(\omega t + \alpha_s) \\ i_r(t) = \sqrt{2}I_r \sin(\omega t + \alpha_r) \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} i_{si}(t) = \sqrt{2}I_{si} \sin(\omega t + \alpha_{si}) & (i = 1, \dots, m) \\ i_{rj}(t) = \sqrt{2}I_{rj} \sin(\omega t + \alpha_{rj}) & (j = 1, \dots, n) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $t$  为时间,单位 s; $\omega$  为角频率,单位 rad/s; $U_s$  和  $U_r$  分别为节点  $s$  和  $r$  的电压有效值,单位 p.u.; $\varphi_s$  和  $\varphi_r$  分别为对应电压初相位,单位 rad; $I_s$  和  $I_r$  分别为  $s$  和  $r$  端的支路电流有效值,单位 p.u.; $\alpha_s$  和  $\alpha_r$  分别为对应支路电流初相位,单位 rad; $I_{si}$  和  $I_{rj}$  分别为  $s$  端源  $i$  和  $r$  端流  $j$  的电流有效值,单位 p.u.; $\alpha_{si}$  和  $\alpha_{rj}$  分别为对应电流初相位,单位 rad。图 1 中箭头设为电流正向。

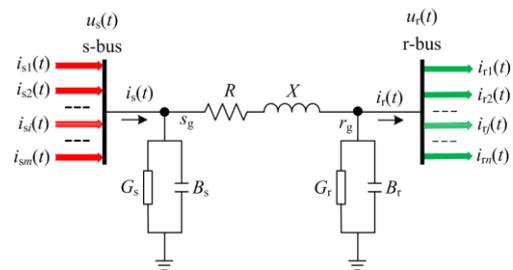


图 1 交流支路端节点带多源流的  $\Pi$  型等值电路

Fig. 1  $\Pi$ -type equivalent AC branch with multiple sources and flows at the sending and receiving buses

文献[27]已针对  $r$ (或  $s$ )端独立带多流(或源)情形,分析了各流(或源)能量穿越与阻抗支路占用(含

能耗)情况。为更好地分析全网规模的源流 EDR, 需研究更具一般性的 s 和 r 端同时带多个源流且跨越  $\Pi$  型等值支路时的 EDR。

图 1 中理论上存在  $m \times n$  个源-流对。要分析清楚所有对的 EDR, 需先厘清由 s 端源  $i$  和 r 端流  $j$  构成的任一支路源-流对  $\langle i-j \rangle$  的瞬时电流分配关系, 即需先讨论和解决两个子问题:

[Q<sub>1</sub>]  $i_{si}(t)$  在  $i_s(t)$  中和  $i_{rj}(t)$  在  $i_r(t)$  中占有的分量(分别记为  $i_{s(i)}(t)$  和  $i_{r(j)}(t)$ )各是多少?

[Q<sub>2</sub>] 分量  $i_{s(i)}(t)$  和  $i_{r(j)}(t)$  跨越  $\Pi$  型等值支路建立的分配关系是什么?

## 2 交流支路源-流对瞬时电流分配关系

### 2.1 送受端支路瞬时电流中的源流成分计算

节点 s 和 r 的瞬时电流单向汇流量为

$$\begin{cases} i_{sc}(t) = \sum_{k=1}^m i_{sk}(t) - i_s(t) & (i_{sk} > 0, i_s < 0) \\ i_{rc}(t) = \sum_{k=1}^n i_{rk}(t) - i_r(t) & (i_{rk} > 0, i_r < 0) \end{cases} \quad (4)$$

$i_{si}(t)$  在  $i_s(t)$  中、 $i_{rj}(t)$  在  $i_r(t)$  中占有的成分为

$$\begin{cases} i_{s(i)}(t) = \begin{cases} i_{si}(t) i_s(t) \operatorname{sgn}[i_s(t)] / i_{sc}(t) & i_{si} i_s > 0 \\ 0 & i_{si} i_s \leq 0 \end{cases} \\ i_{r(j)}(t) = \begin{cases} i_{rj}(t) i_r(t) \operatorname{sgn}[i_r(t)] / i_{rc}(t) & i_{rj} i_r > 0 \\ 0 & i_{rj} i_r \leq 0 \end{cases} \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $\operatorname{sgn}()$  为标准符号函数。

式(5)基于比例共享定理<sup>[26]</sup>, 各成分间满足:

$$\begin{cases} i_{s(i)}(t) i_s(t) \geq 0 \\ i_{r(j)}(t) i_r(t) \geq 0 \\ \sum_{i=1}^m i_{s(i)}(t) = i_s(t) \\ \sum_{j=1}^n i_{r(j)}(t) = i_r(t) \end{cases} \quad (6)$$

至此, [Q<sub>1</sub>]得以解决, 图 1 可演变为图 2。

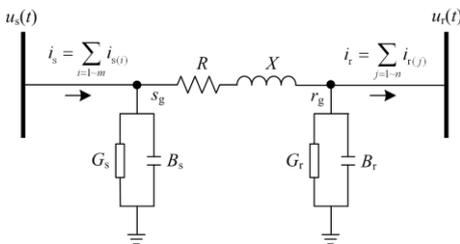


图 2  $\Pi$  型等值交流支路与支路电流成分

Fig. 2  $\Pi$ -type equivalent AC branch and its current components

### 2.2 支路上源流电流瞬时成分间的分配关系

图 2 中,  $i_{s(i)}(t)$  和  $i_{r(j)}(t)$  间隔  $s_g$  和  $r_g$  两个节点,

呈“可望不可及”状, 不利于直接分析分配关系。为此, 应用角-星变换将其变为图 3 T 型电路, 便可建立虚拟中心节点 c 处的“面对面”联系。图 3 中的支路阻抗和接地阻抗参数为

$$\begin{cases} Z_{ss} = R_{ss} + jX_{ss} = ZZ_g Y_r \\ Z_{rr} = R_{rr} + jX_{rr} = ZZ_g Y_s \\ Z_g = R_g + jX_g = 1/(ZY_s Y_r + Y_s + Y_r) \end{cases} \quad (7)$$

节点 c 电压、接地支路电流瞬时值为

$$\begin{cases} u_c(t) = \sqrt{2} U_c \sin(\omega t + \varphi_c) \\ i_g(t) = \sqrt{2} I_g \sin(\omega t + \alpha_g) \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $U_c$  和  $\varphi_c$  分别为电压有效值(p.u.)和初相位(rad);  $I_g$  和  $\alpha_g$  分别为电流有效值(p.u.)和初相位(rad)。

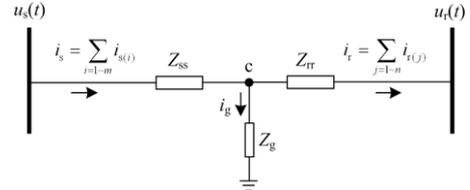


图 3 T 型等值交流支路与支路电流成分

Fig. 3 T-type equivalent AC branch and its current components

基于图 3, 应用比例共享定理<sup>[26]</sup>可写出  $i_{s(i)}(t)$  和  $i_{r(j)}(t)$  间的瞬时电流分配关系, 见表 1。表中所列计算条件以外的其他情形电流均为 0; 第 1 列符号下标中的“ $\rightarrow/\leftarrow$ ”表示电流流向(正向同图 3 箭头方向); “g”表示地节点;  $i_{cc}$  为节点 c 瞬时电流单向汇流量, 可表示为

$$i_{cc}(t) = i_s(t) - i_r(t) - i_g(t) \quad (i_s > 0, i_r < 0, i_g < 0) \quad (9)$$

表 1 中的各种瞬时电流成分满足式(10)。

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n i_{s(i)-r(j)}(t) + i_{s(i)-g}(t) = i_{s(i)}(t) \\ \sum_{i=1}^m i_{s(i)-r(j)}(t) - i_{r(j)-g}(t) = i_{r(j)}(t) \end{cases} \quad (10)$$

其中

$$\begin{cases} i_{s(i)-r(j)}(t) = i_{s(i) \rightarrow r(j)}(t) + i_{s(i) \leftarrow r(j)}(t) \\ i_{s(i)-g}(t) = i_{s(i) \rightarrow g}(t) + i_{s(i) \leftarrow g}(t) \\ i_{r(j)-g}(t) = i_{r(j) \rightarrow g}(t) + i_{r(j) \leftarrow g}(t) \end{cases} \quad (11)$$

表 1  $i_{s(i)}$  和  $i_{r(j)}$  间的分配关系

Table 1 Allocation relationship between  $i_{s(i)}$  and  $i_{r(j)}$

电流成分	计算式	计算条件
$i_{s(i) \rightarrow r(j)}$	$i_{s(i)} i_{r(j)} / i_{cc}$	$i_s > 0$ 且 $i_r > 0$
$i_{s(i) \leftarrow r(j)}$	$-i_{s(i)} i_{r(j)} / i_{cc}$	$i_s < 0$ 且 $i_r < 0$
$i_{s(i) \rightarrow g}$	$i_{s(i)} i_g / i_{cc}$	$i_s > 0$ 且 $i_g > 0$
$i_{s(i) \leftarrow g}$	$-i_{s(i)} i_g / i_{cc}$	$i_s < 0$ 且 $i_g < 0$
$i_{r(j) \rightarrow g}$	$-i_{r(j)} i_g / i_{cc}$	$i_r < 0$ 且 $i_g > 0$
$i_{r(j) \leftarrow g}$	$i_g i_{r(j)} / i_{cc}$	$i_r > 0$ 且 $i_g < 0$

由表 1 知, 式(11)右端两项不会同时取非 0 值。对式(10), 在  $i_{s(i)}$  中有  $n$  个子成分流经  $Z_{ss}$  和  $Z_{rr}$ , 与  $r$  端  $n$  个流发生关系, 剩余的子成分流经  $Z_{ss}$  和  $Z_g$ , 与地发生关系; 在  $i_{r(j)}$  中, 有  $m$  个子成分流经  $Z_{ss}$  和  $Z_{rr}$ , 与  $s$  端  $m$  个源发生关系, 剩余的子成分流经  $Z_{rr}$  和  $Z_g$ , 与地发生关系。

至此,  $[Q_2]$ 得以解决。

### 3 交流支路源-流对能量分配关系

在解决 $[Q_1]$ 和 $[Q_2]$ 后, 为进一步分析 EDR, 尚需继续回答 3 个子问题。

$[Q_3]$  源  $i$  在支路  $s$  端为流  $j$  净送出多少能量(发货量)?

$[Q_4]$  流  $j$  在支路  $r$  端从源  $i$  为其送出的能量中净获得多少(收货量)?

$[Q_5]$  在完成 $\langle i-j \rangle$ 上述能量成分传输业务的过程中, 支路能耗多大(货损量)?

上述子问题可简略概括为源-流对能量成分间的“发-损-收”问题。下文先分析瞬时功率的“发-损-收”成分, 然后再分析对应的 EDR。

#### 3.1 支路上源-流对各种瞬时功率成分计算

在  $t$  时刻, 由 $\langle i-j \rangle$ 中的源  $i$  输出且能够被流  $j$  接收到的瞬时功率成分为

$$\begin{cases} p_{ss(i)-r(j)}(t) = u_s(t)i_{s(i)-r(j)}(t) \\ p_{s(i)-rr(j)}(t) = u_r(t)i_{s(i)-r(j)}(t) \end{cases} \quad (12)$$

式(12)中: 子式 1 为源  $i$  的输出量( $>0$  为发出、 $<0$  为收到), 子式 2 为流  $j$  的输入量( $>0$  为收到、 $<0$  为发出)。

因传输上述功率成分产生的功耗为

$$\begin{cases} d_{ss(i)-r(j)}^{(load)}(t) = i_{s(i)-r(j)}(t)i_s(t)R_{ss} \\ d_{s(i)-rr(j)}^{(load)}(t) = i_{s(i)-r(j)}(t)i_r(t)R_{rr} \\ d_{s(i)-r(j)}^{(load)}(t) = d_{ss(i)-r(j)}^{(load)}(t) + d_{s(i)-rr(j)}^{(load)}(t) \end{cases} \quad (13)$$

式(13)中: 子式 1 和子式 2 分别为在  $R_{ss}$  和  $R_{rr}$  上产生的功耗。

由图 3 知, 节点  $c$  等效为源和流的分界点。  $R_{ss}$  在分界点左侧, 为源侧内电阻,  $R_{rr}$  在分界点右侧, 为流侧外电阻。成分  $i_{s(i)-r(j)}(t)$  流通于“源+流”构成的回路中, 就电路理论, 其在内阻上的功耗应由“源”承担、在外阻上的功耗应由“流”承担, 故可将  $d_{ss(i)-r(j)}^{(load)}$  和  $d_{s(i)-rr(j)}^{(load)}$  分摊给源  $i$  和流  $j$ 。

由于原问题理论上存在  $m \times n$  个源-流对, 故由式(12)和式(13)计算的瞬时功率, 最多存在  $m \times n$  组。

对 $\langle i-j \rangle$ , 除了存在源  $i$  和流  $j$  因收发功率产生的直接关系外, 还存在通过等效接地支路进行电气交换的间接关系。由后者引起的功耗有别于式(13)

的“负载损耗”属性, 应属于输变电设备普遍存在的“空载损耗”范畴。

源  $i$  通过等效接地支路形成的回路电流在  $R_{ss}$  和  $R_g$  上的空载功耗, 流  $j$  通过等效接地支路形成的回路电流在  $R_{rr}$  和  $R_g$  上的空载功耗可表示为

$$\begin{cases} d_{ss(i)}^{(non-load)}(t) = i_{s(i)-g}(t)[i_g(t)R_g + i_s(t)R_{ss}] \\ d_{rr(j)}^{(non-load)}(t) = i_{r(j)-g}(t)[i_g(t)R_g - i_r(t)R_{rr}] \end{cases} \quad (14)$$

各种瞬时功耗成分间满足式(15)。

$$\sum_{i=1}^m d_{ss(i)}(t) + \sum_{j=1}^n d_{rr(j)}(t) = i_s^2(t)R_{ss} + i_r^2(t)R_{rr} + i_g^2(t)R_g \quad (15)$$

其中

$$\begin{cases} d_{ss(i)}(t) = d_{ss(i)}^{(load)}(t) + d_{ss(i)}^{(non-load)}(t) \\ d_{rr(j)}(t) = d_{rr(j)}^{(load)}(t) + d_{rr(j)}^{(non-load)}(t) \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} d_{ss(i)}^{(load)}(t) = \sum_{j=1}^n d_{ss(i)-r(j)}^{(load)}(t) \\ d_{rr(j)}^{(load)}(t) = \sum_{i=1}^m d_{s(i)-rr(j)}^{(load)}(t) \end{cases} \quad (17)$$

于是, 可回答 $\langle i-j \rangle$ 的瞬时功率“发-损-收”问题: 在  $t$  时刻, 源  $i$  发出  $p_{ss(i)-r(j)}(t)$ , 流  $j$  从中收到  $p_{s(i)-rr(j)}(t)$ , 路中损耗  $d_{s(i)-r(j)}^{(load)}(t)$  (负载功耗)。

基于此, 可汇总得源  $i$  面向流集合在  $s$  端总发出的、流  $j$  面向源集合在  $r$  端总接收的, 以及由二者分别承担损耗的瞬时功率。

1) 源  $i$  从  $s$  端输入的瞬时功率( $>0$  为流进支路,  $<0$  为流出支路)为

$$p_{s(i)}(t) = u_s(t)i_{s(i)}(t) \quad (18)$$

2) 流  $j$  从  $r$  端输出的瞬时功率( $>0$  为流出支路,  $<0$  为流进支路)为

$$p_{r(j)}(t) = u_r(t)i_{r(j)}(t) \quad (19)$$

3) 在完成上述功率传输业务的过程中, 源  $i$  承担功耗  $d_{ss(i)}(t)$ , 流  $j$  承担功耗  $d_{rr(j)}(t)$ , 二者均包含负载损耗和空载损耗两种成分。

至此, 已解决源-流对的瞬时功率“发-损-收”问题。接下来, 就可继续回答子问题 $[Q_3]$ — $[Q_5]$ 了。

#### 3.2 支路上源-流对各种能量成分计算

在 1 个工频周期  $T$  内, 源  $i$  在  $s$  端为流  $j$  净送出的能量(对应 $[Q_3]$ 的发货量)、流  $j$  在  $r$  端从中净获得的能量(对应 $[Q_4]$ 的收货量)为

$$\begin{cases} e_{ss(i)-r(j)} = \int_T p_{ss(i)-r(j)}(t) dt \\ e_{s(i)-r(j)} = \int_T p_{s(i)-rr(j)}(t) dt \end{cases} \quad (20)$$

分别累加式(20)中子式 1 所有流的成分和子式 2 所有源的成分, 可得  $T$  内, 源  $i$  在  $s$  端为流集合净

送出的能量和流  $j$  在  $r$  端从源集合净获得的能量为

$$\begin{cases} e_{ss(i)} = \sum_{j=1}^n e_{ss(i)-r(j)} \\ e_{rr(j)} = \sum_{i=1}^m e_{s(i)-rr(j)} \end{cases} \quad (21)$$

源  $i$  发送  $e_{ss(i)-r(j)}$  和流  $j$  接收  $e_{s(i)-rr(j)}$  共同产生的负载能耗(对应[Q5]的货损量)为

$$w_{s(i)-r(j)}^{(load)} = w_{ss(i)-r(j)}^{(load)} + w_{s(i)-rr(j)}^{(load)} \quad (22)$$

其中

$$\begin{cases} w_{ss(i)-r(j)}^{(load)} = \int_T d_{ss(i)-r(j)}^{(load)}(t) dt \\ w_{s(i)-rr(j)}^{(load)} = \int_T d_{s(i)-rr(j)}^{(load)}(t) dt \end{cases} \quad (23)$$

累加可得源  $i$  和流  $j$  承担的总负载能耗为

$$\begin{cases} w_{ss(i)}^{(load)} = \sum_{j=1}^n w_{ss(i)-r(j)}^{(load)} \\ w_{rr(j)}^{(load)} = \sum_{i=1}^m w_{s(i)-rr(j)}^{(load)} \end{cases} \quad (24)$$

除此, 由源  $i$  和流  $j$  分别引起的空载能耗为

$$\begin{cases} w_{ss(i)}^{(non-load)} = \int_T d_{ss(i)}^{(non-load)}(t) dt \\ w_{rr(j)}^{(non-load)} = \int_T d_{rr(j)}^{(non-load)}(t) dt \end{cases} \quad (25)$$

综上, 可得源  $i$  和流  $j$  分担的总能耗为

$$\begin{cases} w_{ss(i)} = w_{ss(i)}^{(non-load)} + w_{ss(i)}^{(load)} \\ w_{rr(j)} = w_{rr(j)}^{(non-load)} + w_{rr(j)}^{(load)} \end{cases} \quad (26)$$

源  $i$  从  $s$  端净发出的、流  $j$  在  $r$  端净接收的总能量为

$$\begin{cases} e_{s(i)} = \int_T p_{s(i)}(t) dt \\ e_{r(j)} = \int_T p_{r(j)}(t) dt \end{cases} \quad (27)$$

式(26)和式(27)满足式(28)。

$$\sum_{i=1}^m e_{hdo(i)} = \sum_{j=1}^n e_{hdo(j)} \quad (28)$$

其中

$$\begin{cases} e_{hdo(i)} = e_{s(i)} - w_{ss(i)} \\ e_{hdo(j)} = e_{r(j)} + w_{rr(j)} \end{cases} \quad (29)$$

式(28)说明,  $s$  端由源集合净发送的总能量, 减去其分担的总能耗后的值(相当于能量发送点前移至  $c$  点), 与  $r$  端由流集合净接收的总能量, 加上其分担的总能耗后的值(能量接收点前移至  $c$  点), 二者相等。这意味着源流集合在  $c$  点实现了能量“无缝交接”, 即节点  $c$  发挥着能量无损路由的作用(相当于扮演“零货损中转口岸”的角色)。

式(29)说明, 在  $c$  点交接的能量中,  $e_{hdo(i)}$  为源  $i$  交接成分, 来自于  $s$  端的  $e_{s(i)}$ , 且分担能耗  $w_{ss(i)}$ ;  $e_{hdo(j)}$

为流  $j$  交接成分, 送往  $r$  端的  $e_{r(j)}$ , 且分担能耗  $w_{rr(j)}$ 。

由式(28)和式(29)提供的源/流集合及其个体交接能量的信息, 最终可回答< $i$ - $j$ >沿支路送受端直达的(即不含其他源流中途汇入的及中途分流给其他源流的)能量成分究竟为多大的问题。

[Q6] 在源  $i$  净发出的能量  $e_{s(i)}$  中, 有多少(记  $E_{thr-s(i)}$ )随同  $e_{s(i)}$  从  $s$  端发出, 途中损失多少, 最终剩余多少(记  $E_{thr-r(j)}$ )到达  $r$  端汇入能量  $e_{r(j)}$  中?

考虑  $c$  点交接能量可能存在异向性, 统计单向(只进或只出)总交接能量为

$$E_{hdo} = \sum_{i=1}^m e_{hdo(i)} - \sum_{j=1}^n e_{hdo(j)} \quad (e_{hdo(i)} > 0, e_{hdo(j)} < 0) \quad (30)$$

于是, < $i$ - $j$ >沿该支路直达的能量成分在  $c$  点交接时的值为

$$e_{hdo-thr(ij)} = [e_{hdo(i)} e_{hdo(j)}] / E_{hdo} \quad (31)$$

直达能量成分在  $s$  侧和  $r$  侧分担的能耗及其相对于总能耗的占比系数为

$$\begin{cases} \mathcal{E}_{thr-s(ij)} = \frac{e_{hdo-thr(ij)}}{e_{hdo(i)}} w_{ss(i)} \\ \mathcal{E}_{thr-r(ij)} = \frac{e_{hdo-thr(ij)}}{e_{hdo(j)}} w_{rr(j)} \end{cases} \quad (32)$$

$$\begin{cases} \sigma_{thr-s(ij)} = \frac{\mathcal{E}_{thr-s(ij)}}{\mathcal{E}_{thr-s(ij)} + \mathcal{E}_{thr-r(ij)}} \\ \sigma_{thr-r(ij)} = \frac{\mathcal{E}_{thr-r(ij)}}{\mathcal{E}_{thr-s(ij)} + \mathcal{E}_{thr-r(ij)}} = 1 - \sigma_{thr-s(ij)} \end{cases} \quad (33)$$

$E_{thr-s(i)}$  和  $E_{thr-r(j)}$  及其沿支路传输的效率为

$$\begin{cases} E_{thr-s(i)} = e_{hdo-thr(ij)} + \mathcal{E}_{thr-s(ij)} \\ E_{thr-r(j)} = e_{hdo-thr(ij)} - \mathcal{E}_{thr-r(ij)} \end{cases} \quad (34)$$

$$\eta_{thr-(ij)} = \frac{E_{thr-r(j)}}{E_{thr-s(i)}} \times 100\% \quad (35)$$

至此, 解决了子问题[Q6]。由其提供的信息( $e_{s(i)}$ ,  $e_{r(j)}$ ,  $E_{thr-s(i)}$ ,  $E_{thr-r(j)}$ ,  $\eta_{thr-(ij)}$ ,  $\sigma_{thr-s(ij)}$ ), 将对第5节设计交直流混联电网 EDR 算法起关键作用。

#### 4 直流支路源流对能量分配关系

实际电网中, 直流支路应是包括换流(整流和逆变)站、换流变、直流线路、滤波器、无功补偿器等在内的系统。对其源流 EDR 问题, 若完全仿照交流支路瞬时值解析思路, 则需分析换流站详细换流过程, 这势必增加复杂性。考虑到问题最终关注的是 EDR (可不必过度关注换流开关状态细节), 为降低难度, 本文尝试另一种思路。

由直流系统模型可知,在某一稳态运行工况(由交/直流运行条件共同决定)下,立足换流站(含换流变)交流侧母线观察,无论采取计算还是测量手段,均可在技术层面获得电压和电流相量以及复功率等信息(图4所示)。



图4 直流输电系统交流侧母线计量信息

Fig. 4 AC side information of HVDC transmission system

由图4可见,无论直流系统内部参数如何,均可由交流侧等效端口信息求得送端(整流站)输出的、受端(逆变站)接收的功率或能量,及经过直流系统损耗的功率或能量等关键量。由此可以等效建立从交流系统观察直流系统时的虚拟交流化支路(Π型或T型)模型。直流系统交流化等效思想在许多问题中有所应用<sup>[29]</sup>。本文采用虚拟交流化支路模型并应用第1—3节的方法,从而实现对交直流混联电网源流EDR的统一解析。

基于上述思路,下文首先重点分析直流输电系统的等效虚拟交流化支路模型建立过程。

#### 4.1 直流输电系统的等效虚拟交流化支路模型

虚拟交流化T型等值电路如图5所示。

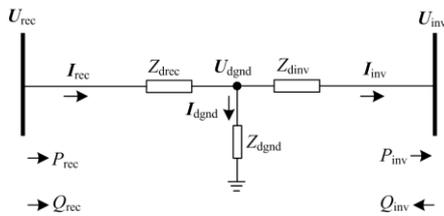


图5 直流输电系统的等效虚拟交流化T型等值电路

Fig. 5 Virtualized T-type equivalent AC circuit of HVDC transmission system

图5交流系统侧的信息,由实际测量或常用交流潮流程序计算结果提供,具体满足式(36)关系。

$$\begin{cases} S_{rec} = P_{rec} + jQ_{rec} = U_{rec} \hat{I}_{rec} \\ S_{inv} = P_{inv} - jQ_{inv} = U_{inv} \hat{I}_{inv} \end{cases} \quad (36)$$

对于左右臂对称(即 $Z_{drec} = Z_{dinv} = Z_{dri}$ )的T型电路,基于交流系统侧的电压和电流(或功率)信息可求得其阻抗参数为

$$\begin{cases} Z_{dri} = R_{dri} + jX_{dri} = \frac{U_{rec} - U_{inv}}{I_{rec} + I_{inv}} \\ Z_{dgnd} = R_{dgnd} + jX_{dgnd} = \frac{U_{dgnd}}{I_{dgnd}} \end{cases} \quad (37)$$

其中

$$\begin{cases} I_{dgnd} = I_{rec} - I_{inv} \\ U_{dgnd} = \frac{U_{rec} I_{inv} + U_{inv} I_{rec}}{I_{rec} + I_{inv}} \end{cases} \quad (38)$$

就有功损耗而言,上述参数应满足式(39)。

$$R_{dri}(I_{rec}^2 + I_{inv}^2) + R_{dgnd}I_{dgnd}^2 = R_{dc}I_d^2 \quad (39)$$

式中: $I_d$ 为直流线路电流; $R_{dc}$ 为直流线路电阻。

#### 4.2 跨直流输电系统的源流对EDR计算

设整流侧交流母线(送端)上带 $m$ 个源,逆变侧交流母线(受端)上带 $n$ 个流,则可通过将图5瞬时值形式(图6)直接类比图3的方式,利用第3节方法计算直流支路源流对各种EDR。然而,采用虚拟交流化方式计算时,需注意的:保持从交流母线观测直流系统等效二端口网络外特性不变,且应使用式(39)对结果正确性进行检验。

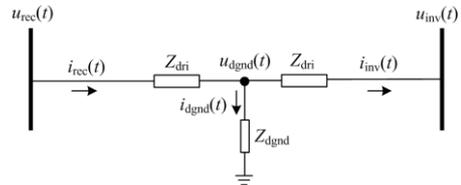


图6 直流系统等效虚拟交流化T型电路的瞬时值形式

Fig. 6 Instantaneous value form of virtualized T-type equivalent AC circuit of HVDC transmission system

#### 5 交直流混联电网源流能量分配关系

综合第3、4节,交直流支路T型电路虚拟节点c,扮演着“零货损中转口岸”的角色,相当于送受端的源流们同时前移至此处交接能量。根据这个特征,可求得电网内所有支路段、全部支路源-流对的EDR。其中,针对某支路任一源-流对 $\langle i-j \rangle$ 分析所得的支路段直达能量成分信息( $e_{s(i)}, e_{r(j)}, E_{thr-s(i)}, E_{thr-r(j)}, \eta_{thr-(ij)}, \sigma_{thr-s(j)}$ ),将直接服务于全网规模的源流EDR算法设计。

一般地,全网规模的源流EDR问题相当于需要计算由网络某源 $i_{net}$ 和某流 $j_{net}$ 构成的任一源-流对 $\langle i_{net}-j_{net} \rangle$ 的能量传输(含能耗)关系。当 $i_{net}$ 和 $j_{net}$ 处于同一节点或同一支路送受端时,属于第3、4节已经分析过的问题,不再赘述;当二者处于不同支路时,需要由下文设计的能量正向追踪或反向追踪算法进行计算。

## 5.1 全网能量正向追踪算法

正向追踪< $i_{\text{net}}-j_{\text{net}}$ >能量关系的算法步骤如下。

### 1) 关联路径链搜索

从  $i_{\text{net}}$  或  $j_{\text{net}}$  节点开始广度搜索能量能够正向外送(或反向汲取)的所有子路径链方向。

若某子链延伸一段支路后在其末端遇到  $j_{\text{net}}$ , 则停止该子链的搜索, 并记录其路段构成信息; 若在其末端不存在能量能够继续正向外送的任何通路, 则中止该子链的搜索并无需保存路段构成信息; 否则, 继续搜索。当各子链均无需或无法延伸时, 停止< $i_{\text{net}}-j_{\text{net}}$ >的关联路径链搜索。

记搜索获得的所有有效子路径链组成集合  $\Omega_{\text{link}}$ 。以子链  $\Psi \in \Omega_{\text{link}}$  为例, 设其共由  $L$  段交直流支路段顺序构成, 且  $i_{\text{net}}$  位于第 1 路段的送端节点、 $j_{\text{net}}$  位于第  $L$  路段的受端节点。下述对步骤 2)和 3)的叙述均以  $\Psi$  为例进行。

### 2) 各路段直达能量成分计算

应用第 3 节方法可计算出  $\Psi$  中所有  $L$  路段的直达能量成分。为便于阐述, 记由第  $l$  路段直达能量成分信息构成的向量为

$$\mathbf{H}^{(l)} = [e_{s(i)}^{(l)} \quad e_{r(j)}^{(l)} \quad E_{\text{thr-s}(i)}^{(l)} \quad E_{\text{thr-r}(j)}^{(l)} \quad \eta_{\text{thr-(ij)}}^{(l)} \quad \sigma_{\text{thr-s}(ij)}^{(l)}]^\text{T} \quad (40)$$

式中: 当  $l=1$  时, 下标中的  $i$  对应源  $i_{\text{net}}$ ; 当  $l=L$  时, 下标中的流  $j$  对应流  $j_{\text{net}}$ ; 当  $1 \leq l \leq L-1$  时,  $e_{r(j)}^{(l)} = e_{s(i)}^{(l+1)}$ , 或当  $2 \leq l \leq L$  时,  $e_{r(j)}^{(l-1)} = e_{s(i)}^{(l)}$ 。

### 3) 全链直达能量成分计算

由步骤 2)计算出的各路段直达能量成分, 通常情况下还不是全链直达能量成分。原因在于: 在第  $l$  路段受端和第  $l+1$  路段送端汇流母线上, 可能存在其他源流(包括接在该母线上的电源和负荷以及进/出线的等效源和荷)的汇入和分流作用, 由此造成全链直达能量值应不大于各路段直达能量中的最小值。待求的全链直达能量, 应是由第 1 路段送端发出的, 且能够被第  $L$  路段受端接收到的对应成分, 即不应含其他源流中途汇入和分流给其他源流的成分。具体计算方法如下所述。

(1) 置路段变量初值  $l=2$ 。

(2) 计算由第  $l$  路段送端节点观测到的, 在第  $l-1$  和第  $l$  路段均表现为直达属性的能量成分。

$$W_{\text{thr-s}}^{(l)} = E_{\text{thr-r}(j)}^{(l-1)} E_{\text{thr-s}(i)}^{(l)} / e_{s(i)}^{(l)} \quad (41)$$

将其折算至第  $l$  路段受端的值为

$$W_{\text{thr-r}}^{(l)} = \eta_{\text{thr-(ij)}}^{(l)} W_{\text{thr-s}}^{(l)} \quad (42)$$

(3) 路段变量  $l$  加 1 且其新值  $\leq L$ 。

计算由第  $l$  路段送端节点观测到的, 在第  $l-1$  和第  $l$  路段均表现为直达属性的能量成分。

$$W_{\text{thr-s}}^{(l)} = W_{\text{thr-r}}^{(l-1)} E_{\text{thr-s}(i)}^{(l)} / e_{s(i)}^{(l)} \quad (43)$$

将其代入式(42)得折算至第  $l$  路段受端的值  $W_{\text{thr-r}}^{(l)}$ 。

循环执行(3), 直至  $l=L$ 。最终求得的  $W_{\text{thr-r}}^{(L)}$  就是  $j_{\text{net}}$  在  $\Psi$  末端接收到的, 由  $i_{\text{net}}$  配送的且一直沿  $\Psi$  输送的直达能量成分。

(4) 计算  $i_{\text{net}}$  在  $\Psi$  首端专为  $j_{\text{net}}$  配送的直达能量成分。

$$W_{\text{thr-s}}^{(1)} = W_{\text{thr-r}}^{(L)} / \prod_{l=1}^L \eta_{\text{thr-(ij)}}^{(l)} \quad (44)$$

(5) 计算链直达能量成分产生的能耗链直达能量成分产生的总能耗为

$$\Delta_{\text{thr}} = W_{\text{thr-s}}^{(1)} - W_{\text{thr-r}}^{(L)} = \sum_{l=1}^L \Delta_{\text{thr}}^{(l)} \quad (45)$$

分摊给  $i_{\text{net}}$  和  $j_{\text{net}}$  的值分别为

$$\begin{cases} \Delta_{\text{thr-}i_{\text{net}}} = \sum_{l=1}^L [\sigma_{\text{thr-s}(ij)}^{(l)} \Delta_{\text{thr}}^{(l)}] \\ \Delta_{\text{thr-}j_{\text{net}}} = \sum_{l=1}^L [(1 - \sigma_{\text{thr-s}(ij)}^{(l)}) \Delta_{\text{thr}}^{(l)}] \end{cases} \quad (46)$$

其中, 第  $l$  路段产生的能耗为

$$\Delta_{\text{thr}}^{(l)} = W_{\text{thr-s}}^{(1)} (1 - \eta_{\text{thr-(ij)}}^{(l)}) \prod_{k=1}^{l-1} \eta_{\text{thr-(ij)}}^{(k)} \quad (47)$$

式中, 当  $l=1$  时,  $\prod_{k=1}^0 = 1$ 。

至此, 全部求得< $i_{\text{net}}-j_{\text{net}}$ >沿  $\Psi$  配送能量的信息:  $i_{\text{net}}$  在链首发出  $W_{\text{thr-s}}^{(1)}$ , 到达第  $l$  路段受端时剩余  $W_{\text{thr-s}}^{(1)} \prod_{k=1}^l \eta_{\text{thr-(ij)}}^{(k)}$ , 链末被  $j_{\text{net}}$  接收到  $W_{\text{thr-s}}^{(1)} \prod_{k=1}^L \eta_{\text{thr-(ij)}}^{(k)}$ ; 第  $l$  路段能耗为  $\Delta_{\text{thr}}^{(l)}$ , 全链总能耗为  $\Delta_{\text{thr}}$ , 分摊给  $i_{\text{net}}$  和  $j_{\text{net}}$  的值分别为  $\Delta_{\text{thr-}i_{\text{net}}}$ 、 $\Delta_{\text{thr-}j_{\text{net}}}$ , 由此汇总  $\Omega_{\text{link}}$ , 可得< $i_{\text{net}}-j_{\text{net}}$ >的所有 EDR。

## 5.2 全网能量反向追踪算法

反向追踪算法步骤 1)和 2)可同正向追踪算法, 故下面只重点阐述步骤 3), 并仍以  $\Psi$  为例。

### 3) 全链直达能量成分计算

(1) 置路段变量初值  $l=L-1$ ;

(2) 计算由第  $l$  路段受端节点观测到的, 在第  $l$  和第  $l+1$  路段均表现为直达属性的能量成分。

$$W_{\text{thr-r}}^{(l)} = E_{\text{thr-r}(j)}^{(l)} E_{\text{thr-s}(i)}^{(l+1)} / e_{s(i)}^{(l+1)} = E_{\text{thr-r}(j)}^{(l)} E_{\text{thr-s}(i)}^{(l+1)} / e_{r(j)}^{(l)} \quad (48)$$

将其折算至第  $l$  路段送端的值为

$$W_{\text{thr-s}}^{(l)} = W_{\text{thr-r}}^{(l)} / \eta_{\text{thr-(ij)}}^{(l)} \quad (49)$$

(3) 路段变量  $l$  减 1 且其新值  $\geq 1$ 。

计算由第  $l$  路段受端节点观测到的、在第  $l$  和第  $l+1$  路段均表现为直达属性的能量成分。

$$W_{thr-r}^{(l)} = E_{thr-r}^{(l)} W_{thr-s(i)}^{(l+1)} / e_{s(i)}^{(l+1)} = E_{thr-r}^{(l)} W_{thr-s(i)}^{(l+1)} / e_{r(j)}^{(l)} \quad (50)$$

将其代入式(49)得折算至第  $l$  路段送端的值  $W_{thr-s}^{(l)}$ 。

循环执行(3), 直至  $l=1$ 。最终求得的  $W_{thr-s}^{(1)}$  就是  $i_{net}$  在  $\Psi$  首端为  $j_{net}$  配送的, 且将一直沿  $\Psi$  输送的直达能量成分。

(4) 计算  $j_{net}$  在  $\Psi$  末端从  $i_{net}$  专为其配送的能量成分中接收到的值。

$$W_{thr-r}^{(L)} = W_{thr-s}^{(1)} \prod_{i=1}^L \eta_{thr-(ij)}^{(i)} \quad (51)$$

(5) 计算链直达能量成分产生的能耗。

链直达能量成分产生的总能耗及其分摊给  $i_{net}$  和  $j_{net}$  的值, 仍分别由式(45)和式(46)计算, 且第  $l$  路段产生的能耗还可依式(52)计算。

$$A_{thr}^{(l)} = W_{thr-r}^{(L)} (1 - \eta_{thr-(ij)}^{(l)}) / \prod_{k=l}^L \eta_{thr-(ij)}^{(k)} \quad (52)$$

至此, 可求得与正向追踪完全相同的 EDR。

## 6 算例分析

### 6.1 计算条件

英格兰 10 机 39 节点系统<sup>[30]</sup>做局部修改: 交流支路 6-5 改为直流线路(整流侧在 6 号节点侧)。选择 31 号节点机组 G31 作为源  $i_{net}$ 、8 号节点负荷 L8 作为流  $j_{net}$ , 组成网络源-流对  $\langle i_{net}-j_{net} \rangle = \langle G31-L8 \rangle$ , 分析其 EDR。

$\langle G31-L8 \rangle$  所处局部电网潮流分布如图 7 所示。图 7 中的复数为电源、负荷和支路复功率(双箭头表示功率流向、位置表示支路送受端)。

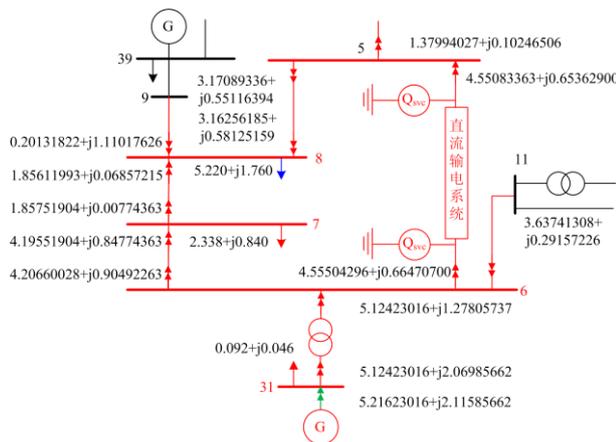


图 7 算例系统局部电网潮流分布

Fig. 7 Local power flow distribution of the example system

局部电网支路阻抗、导纳和节点电压相量参数列于表 2。其中, 支路 31-6 的非标准变比设在 6 号节点侧,  $Q_{svc}$  为整流和逆变站的无功补偿量,  $n_{rec}$  和  $n_{inv}$  分别为整流和逆变侧换流变压器变比;  $X_{crec}$

和  $X_{cinv}$  分别为两侧交流电源等效电抗。计算时模拟系统频率为 50 Hz, 所得能量均为  $T = 0.02$  s 内的值。

表 2 局部电网参数

Table 2 Local network parameters

节点	电压		节点	电压	
	幅值/p.u.	相位/(°)		幅值/p.u.	相位/(°)
31	0.982	0.000	7	0.99350494	-10.18099000
5	1.00148876	-8.65781861	8	0.99258009	-10.67637454
6	1.00410601	-7.99084651			
交流支路	R/p.u.	X/p.u.	$B_{sr}$ /p.u.	非标准变比/p.u.	
31-6*	0.0000	0.0250	—	1.0700	
5-8	0.0008	0.0112	0.0738	—	
6-7	0.0006	0.0092	0.0565	—	
7-8	0.0004	0.0046	0.0390	—	
直流线路	$X_{crec}$ /p.u.	$X_{cinv}$ /p.u.	$n_{rec}$ /p.u.	$n_{inv}$ /p.u.	$R_{dc}$ /p.u.
	0.0001	0.0001	0.995	1.000	0.0002
6-5	$\alpha$ (°)	$\gamma$ (°)	$Q_{svc-rec}$ /p.u.	$Q_{svc-inv}$ /p.u.	
	10.15984141	7.7206435	0.16307591	1.28551249	

### 6.2 结果与分析

#### 6.2.1 关联路径链搜索结果

服务于  $\langle G31-L8 \rangle$  电能传输的路径链共 2 条: 子链 I 由支路段 31-6  $\Rightarrow$  6-7  $\Rightarrow$  7-8 构成, 子链 II 由支路段 31-6  $\Rightarrow$  6-5  $\Rightarrow$  5-8 构成, 即二者均由  $L=3$  段支路构成, 且子链 II 包含直流线路 6-5。

下文先从方便理解的角度, 以子链 I 为例, 比较详细地给出利用追踪算法计算其传输  $\langle G31-L8 \rangle$  电能的过程信息以及与其他方法进行比较的结果; 再从篇幅受限角度考虑, 摘要给出沿子链 II 传输  $\langle G31-L8 \rangle$  电能的关键信息和最终结果; 最后, 通过汇总子链 I 和 II 送端发出的、受端接收的和链中损失的电能成分, 得  $\langle G31-L8 \rangle$  的整体 EDR 计算结果。

#### 6.2.2 子链 I 各路段直达能量成分计算结果

表 3 列出了 3 个路段直达能量成分计算结果。

表 3 子链 I 各路段直达能量成分计算结果

Table 3 Through-energy of each branch for subchain I

能量成分	支路段 31-6 ( $l=1$ )	支路段 6-7 ( $l=2$ )	支路段 7-8 ( $l=3$ )
$e_{s(i)}$ /p.u.s	0.10248328	0.04934408	0.03700712
$e_{r(j)}$ /p.u.s	0.04934408	0.03700712	0.03496381
$E_{thr-s(i)}$ /p.u.s	0.04931695	0.02176021	0.03485527
$E_{thr-r(j)}$ /p.u.s	0.04931695	0.02170348	0.03482897
$\eta_{thr-(ij)}$ %	100.000000	99.739304	99.924533
$\sigma_{thr-s(ij)}$	0.500000	0.509465	0.498728

#### 6.2.3 子链 I 全链直达能量成分计算结果

表 4 列出了分别应用正、反向追踪算法对子链 I 进行计算时的主要过程信息。

表 4 子链 I 正反向追踪主要过程信息

Table 4 Main process information of subchain I by using forward and backward energy-tracking algorithm

算法	过程 1		过程 2		过程 3	
	$l=2$		$l=3$		式 (44)	$\underline{0.02041483/}$ (100%× 99.739304%× 99.924533%)= $\underline{0.02048365}$
正向追踪	式 (41)	0.04931695×	式 (43)	0.02169155×		
		0.02176021/		0.03485527/		
	0.04934408=	0.03700712=				
	$\underline{0.02174825}$	$\underline{0.02043025}$				
式 (42)	99.739304%×	式 (42)	99.924533%×	式 (44)	$\underline{0.02048365}$	
	$\underline{0.02174825}$ =		$\underline{0.02043025}$ =			
式 (42)	0.02169155	式 (42)	$\underline{0.02041483}$	式 (44)	$\underline{0.02048365}$	
反向追踪	式 (48)	0.02170348×	式 (50)	0.04931695×	式 (51)	$\underline{0.02048365} \times$ (100%× 99.739304%× 99.924533%)= $\underline{0.02041483}$
		0.03485527/		$\underline{0.02049492/}$		
	0.03700712=	0.04934408=				
	$\underline{0.02044149}$	$\underline{0.02048365}$				
式 (49)	$\underline{0.02044149/}$	式 (49)	$\underline{0.02048365/}$	式 (51)	$\underline{0.02041483}$	
	99.739304%=		100%=			
式 (49)	$\underline{0.02049492}$	式 (49)	$\underline{0.02048365}$	式 (51)	$\underline{0.02041483}$	

由表 4 可知：正向追踪过程 2 结束时，可先求得  $W_{\text{thr-r}}^{(L)} = 0.02041483$  p.u.s，再求一步便可得  $W_{\text{thr-s}}^{(1)} = 0.02048365$  p.u.s；反向追踪过程 2 结束时，可先求得  $W_{\text{thr-s}}^{(1)} = 0.02048365$  p.u.s，再求一步便可得  $W_{\text{thr-r}}^{(L)} = 0.02041483$  p.u.s；正反向追踪结果相同。

在表 4 基础上，可继续计算出由传输全链直达能量成分引起的能耗分布信息，列于表 5。

表 5 子链 I 直达能量成分引起的能耗分布信息

Table 5 Distribution of energy-loss of subchain I

能耗/p.u.s	支路段 31-6	支路段 6-7	支路段 7-8	全链
G31 分担	0.0	0.00002721	0.00000769	0.00003490
L08 分担	0.0	0.00002619	0.00000773	0.00003392
二者和值	0.0	0.00005340	0.00001542	0.00006882

由表 5 可知：全链总能耗等于  $W_{\text{thr-s}}^{(1)}$  减  $W_{\text{thr-r}}^{(L)}$ ，且 G31 和 L31 分摊值的和、各路段能耗值的和均与此相等，符合能量守恒原理；尽管各支路段 II 型或 T 型电路左右两侧参数相同，但由于 G31 和 L31 瞬时电流/功率特性存在一定差异，导致分摊给 G31 和 L8 的能耗占比与通常认识的各占 50%略有不同(分别为 50.712002%和 49.287998%)。

#### 6.2.4 方法对比分析结果

由文献[31]方法搜索的传输<G31-L8>有功功率的子路径链，与 6.2.1 节完全相同。

同样以子链 I 为例，采用电气剖分方法<sup>[31]</sup>，可

求得 G31 在链首发出的和 L8 在链末接收到的有功功率，以及在各支路段上引起的有功损耗，列于表 6。为了对照，将其乘以 0.02 s 得  $T$  内的能量值，同时一并列出相对于本文方法的偏差。

表 6 子链 I 电气剖分结果

Table 6 Electrical dissection results of subchain I

项目	有功功率/ p.u.	有功能量/ p.u.s	与本文方法计算能量的差	
			绝对值/p.u.s	相对值/%
G31 发出	1.053308	0.02106616	+0.00058250	+2.843730
L8 接收	0.998918	0.01997836	-0.00043648	-2.138053
31-6 段损耗	0.0	0.0	0.0	0.0
6-7 段损耗	0.002793	0.00005586	+0.00000246	+4.606742
7-8 段损耗	0.000828	0.00001656	+0.00000114	+7.392996
全链损耗	0.003621	0.00007242	+0.00000360	+5.232558

由表 6 可知：在相量体系下计算的节点内部交换功率(能量)<sup>[22,31]</sup>，与基于瞬时值计算的值存在一定差异。同时，由于文献[22,31]方法未对其他源流中途加入的成分，或中途分流给其他源流的成分进行特别处理，从而导致求出的由 G31 发出的、被 L8 接收的功率或能量值不具有纯粹的直达属性。相较于本文，其在  $T$  内的平均功率或能量存在百分之几的相对误差，有待完善。

#### 6.2.5 子链 II 直达能量成分计算结果

支路段 6-5 为直流线路，其等效虚拟交流化 T 型电路参数为： $Z_{\text{dri}}=0.00010001+j0.0013004$  p.u.， $Z_{\text{dgd}}=-0.00004512-j23.04212650$  p.u.。子链 II 3 个路段的直达能量计算结果列于表 7。

表 7 子链 II 各路段直达能量成分计算结果

Table 7 Through-energy of each branch for subchain II

能量成分	支路段 31-6 ( $l=1$ )	支路段 6-5 ( $l=2$ )	支路段 5-8 ( $l=3$ )
$e_{s(ij)}$ /p.u.s	0.10248328	0.05319557	0.06342538
$e_{r(ij)}$ /p.u.s	0.05319557	0.06342538	0.06048585
$E_{\text{thr-s}(i)}$ /p.u.s	0.05316633	0.03706965	0.06064295
$E_{\text{thr-r}(i)}$ /p.u.s	0.05316633	0.03703516	0.06048269
$\eta_{\text{thr}(ij)}$ /%	100.000000	99.906958	99.735727
$\sigma_{\text{thr-s}(ij)}$	0.500000	0.500678	0.493104

由正向或反向追踪算法代入表 7 数据，计算得  $W_{\text{thr-s}}^{(1)} = 0.03542394$  p.u.s， $W_{\text{thr-r}}^{(L)} = 0.03529745$  p.u.s；G31 和 L8 分担的能耗分别为 0.00006262 p.u.s 和 0.00006387 p.u.s。

最后，汇总子链 I 和 II 全链直达能量信息可得：G31 在送端共发出 0.05590760 p.u.s，L8 接收到 0.05571229 p.u.s，G31 分担能耗 0.00009751 p.u.s，L8 分担能耗 0.00009779 p.u.s。在此基础上，利用电能结果除以周期(0.02 s)，可得与相应稳态潮流工况对应的平均功率信息：G31 在送端发出功率

2.795380 p.u., L8 接收功率 2.785615 p.u., G31 分担功耗 0.0048755 p.u., L8 分担功耗 0.0048895 p.u.。

## 7 结论

研究了交直流电力网络源流 EDR 解析问题, 取得以下的成果和结论。

1) 针对交流支路源-流对, 提出了分析其瞬时电流、瞬时功率和周期 EDR 的方法, 能够正确计算交流支路源-流对直达能量成分信息向量。

2) 针对直流支路源-流对, 提出了等效虚拟交流化技术及其等值参数计算方法, 可直接调用交流方法计算其直达能量成分信息向量。

3) 基于交/直流支路源-流对直达能量成分信息向量, 提出了能够正确计算任一网络源-流对沿关联路径链配送直达能量成分的正向和反向追踪算法, 二者结果完全相同。

## 参考文献

- [1] 高利明, 吴春红. 发电厂上下网电量关口计量点设置与计算方法研究[J]. 河北电力技术, 2015, 34(6): 18-20. GAO Liming, WU Chunhong. Research on setting and calculating method of power energy gateway metering point during injected into and absorbed from grid for power plant[J]. Hebei Electric Power, 2015, 34(6): 18-20.
- [2] 袁玉英, 罗永刚, 袁慧祥, 等. 物联网智能电能表的设计[J]. 电力信息与通信技术, 2019, 17(4): 72-76. YUAN Yuying, LUO Yonggang, YUAN Huixiang, et al. Design of IoT intelligent electric energy meter[J]. Electric Power ICT, 2019, 17(4): 72-76.
- [3] 杜鹃, 郭文利, 赵志辰, 等. 直流电力分组传输中超级电力包的设计[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(11): 136-142. DU Juan, GAO Wenli, ZHAO Zhichen, et al. Design of a super power packet in DC power packet transmission[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(11): 136-142.
- [4] KABALCI E. Emerging smart metering trends and integration at MV-LV level[C] // 3rd IEEE International Smart Grid Workshop and Certificate Program (ISGWCP), March 21-25, 2016, Istanbul, Turkey: 21-29.
- [5] 韩霄汉, 胡小寒, 姚力, 等. 竞争性电力市场背景下电能计量发展趋势的思考[J]. 浙江电力, 2017, 36(3): 30-33. HAN Xiaohan, HU Xiaohan, YAO Li, et al. Reflection on development trend of electric energy metering in competitive electricity market[J]. Zhejiang Electric Power, 2017, 36(3): 30-33.
- [6] 许圣龙, 于继来. 基于电气剖分信息的电力网络复合源流状态计算[J]. 电网技术, 2013, 37(2): 425-430. XU Shenglong, YU Jilai. Composite flow state computation of power network based on electrical dissection information[J]. Power System Technology, 2013, 37(2): 425-430.
- [7] 吴政球. 关于网损分摊公平性的思考[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(17): 24-26. WU Zhengqiu. Notes on the reasonableness of loss allocation[J]. Automation of Electric Power systems, 2002, 26(17): 24-26.
- [8] 余鹏飞, 朱继忠. 计及输电网络时空风险的动态电价模型[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(9): 180-187. YU Pengfei, ZHU Jizhong. Dynamic electricity pricing model considering space-time risk factor in transmission networks[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(9): 180-187.
- [9] YAN Gangui, LIU Dongyuan, LI Junhui, et al. A cost accounting method of the Li-ion battery energy storage system for frequency regulation considering the effect of life degradation[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(1): 43-51. DOI: 10.1186/s41601-018-0076-2.
- [10] BIALEK J. Tracing the flow of electricity[J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 1996, 143(4): 313-320.
- [11] 王锡凡, 王秀丽. 电流追踪问题[J]. 中国科学: E 辑, 2000, 30(3): 405-412. WANG Xifan, WANG Xiuli. Tracing the current[J]. China Science: Proceedings E, 2000, 30(2): 405-412.
- [12] KUMAR P, GUPTA N, NIAZI K R, et al. Branch current decomposition method for loss allocation in contemporary distribution systems[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2018, 99: 134-145.
- [13] KIRSCHEN D, ALLAN R, STRBAC G. Contributions of individual generators to loads and flows[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1997, 12(1): 52-60.
- [14] 曹昉, 舒雅丽, 李成仁, 等. 基于分类潮流追踪法的特高压输电网损分摊[J]. 中国电力, 2018, 51(7): 54-60. CAO Fang, SHU Yali, LI Chengren, et al. UHV transmission loss allocation based on classified power flow tracing method[J]. Electric Power, 2018, 51(7): 54-60.
- [15] 鲍海, 马千. 电网线损的物理分布机理[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(21): 82-86. BAO Hai, MA Qian. Physical distribution mechanism of network loss for power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(21): 82-86.
- [16] 王海霞, 刘娆, 李卫东. 基于电路理论与正交投影的支路损耗分摊方法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(7):

- 114-120.
- WANG Haixia, LIU Rao, LI Weidong. Branch loss allocation based on circuit theories and orthogonal projection[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(7): 114-120.
- [17] DELBERIS A L, ANTONIO P-F. Allocation of the costs of transmission losses[J]. Electric Power Systems Research, 2004, 72: 13-20.
- [18] 吴政球, 匡文凯, 方日升, 等. 电力系统非线性费用函数分摊公平性准则[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(14): 36-40.
- WU Zhengqiu, KUANG Wenkai, FANG Risheng, et al. Fairness criterion for power system nonlinear function value allocation[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(14): 36-40.
- [19] 荆朝霞, 段献忠, 何仰赞. 函数值分摊理论及其在电力市场中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(2): 9-14.
- JING Zhaoxia, DUAN Xianzhong, HE Yangzan. Function value allocation theory and its applications to electricity market[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(2): 9-14.
- [20] DEBASHISH B, NIDUL S, ASHOKE K S. Investigation of multifarious power transferred through the transmission network for all associated generators in the system individually[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(8): 1848-1855.
- [21] 黄湘, 欧阳森, 马少华. 考虑 DG 对配电网网损贡献率的网损分摊方法[J]. 电测与仪表, 2019, 56(18): 16-24.
- HUANG Xiang, OUYANG Sen, MA Shaohua. Line loss allocation method considering the contribution rate of the distributed generation to distribution network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(18): 16-24.
- [22] YU Jilai, LIU Zhuo. Ponderings and strategies of power loss allocation-Application of united electrical dissection of ac branch and bus[C] // 2006 International Conference on Power System Technology (POWERCON2006). October 22-26, 2006, Chongqing, China.
- [23] TANG Yi, WU Yingjun, LI Yang. A proposal for investment recovery of TCSC based on electrical dissecting method[C] // 2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting, July 26-30, 2009, Calgary, AB, Canada.
- [24] SAVIER J S, DAS D. Energy loss allocation in radial distribution systems: a comparison of practical algorithms[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(1): 260-267.
- [25] 于继来. 基于瞬时值解析的交流输电电路路径电气份额计算[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(25): 4364-4373.
- YU Jilai. Electrical shares calculation of AC transmission line based on instantaneous value[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(25): 4364-4373.
- [26] 孙昊, 于继来. 交流电力网络源流电气关系新解[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(6): 1659-1672.
- SUN Hao, YU Jilai. New analyzing for source-flow electrical relationship in AC power network[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(6): 1659-1672.
- [27] 于继来, 张婷, 盛玉和, 等. 基于瞬时值解析的支路电能损失与成本分摊方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(6): 2064-2074.
- YU Jilai, ZHANG Ting, SHENG Yuhe, et al. Method of branch energy loss and cost allocation based on instantaneous value analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(6): 2064-2074.
- [28] 王帮灿, 刘洋, 崔雪. 基于电碳联动的火电企业补偿机制研究[J]. 电测与仪表, 2019, 56(20): 65-70.
- WANG Bangcan, LIU Yang, CUI Xue. Research on compensation mechanism of thermal power enterprises based on electricity-carbon linkage[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(20): 65-70.
- [29] 张爽, 李宏强, 王峰, 等. 基于电压源换流器的多端柔性直流输电系统拟交流最优潮流[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(13): 31-37.
- ZHANG Shuang, LI Hongqiang, WANG Feng, et al. Quasi-AC optimal power flow for voltage source converter-based multi-terminal DC system[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(13): 31-37.
- [30] PAI M A. Energy function analysis for power system stability[M]. Urbana: Kluwer Academic Publishers, University of Illinois at Champaign, 1989.
- [31] 汤奕, 于继来, 周苏荃. 电力网络源流路径电气剖分算法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(22): 28-33.
- TANG Yi, YU Jilai, ZHOU Suquan. Pondering on the loss allocation problem[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(22): 28-33.

收稿日期: 2020-07-30; 修回日期: 2020-11-18

作者简介:

于继来(1965—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统分析与控制; E-mail: yupwrs@hit.edu.cn

郭钰锋(1977—), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为源网荷协调控制、新能源电力系统等。E-mail: guoyufeng@hit.edu.cn

(编辑 许威)