

# 基于联络线功率等值约束条件的潮流算法研究

姚元玺<sup>1</sup>, 杭乃善<sup>2</sup>

(1. 山东电力工程咨询院, 山东 济南 250013; 2 广西大学电气工程学院, 广西 南宁 530004)

**摘要:** 针对互联电网区域间限制联络线传输功率的要求, 提出了一种系统扰动后维持联络线功率为设定值的新算法。该算法设定联络线的交换功率, 分区域潮流计算, 可以实现通过改变受端系统侧的运行方式, 维持联络线功率为设定值的目的。该算法物理意义清晰, 容易实现, 收敛性好, 给出的算例验证了提出算法的可行性。

**关键词:** 联络线; 功率限制; 潮流计算; 多平衡节点; 互联电网

**中图分类号:** TM744 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)01-0031-03

## 0 引言

随着全国互联电网的初步形成, 各区域电网出于稳定性和经济性的需求, 必须协议联络线上的交换功率, 按照双边电量合同进行交易的运行方式越来越成为互联电力系统的需要。随着用电负荷的持续增加, 会出现以下问题: 区域间联络线上的传输功率是否根据负荷的变化而调整; 送端区域电网的负荷和受端区域电网的负荷同时增加时, 如果增加联络线的传输功率, 是否会造成送端区域电网的功率缺额; 送端功率有缺额时, 如果受端区域电网从送端电网需求更多的功率时, 是否会造成送端系统侧的不稳定。这些问题必须受到重视。文献 [1] 提出了一种基于直角坐标注入电流形式的多平衡节点潮流算法, 能有效解决有多个 V<sub>1</sub> 节点的系统的功率不平衡量在多台选定机组的分摊问题。文献 [2] 提出了一种计及发电机有功 - 频率静态特性和无功 - 电压静态特性的控制潮流算法, 不设平衡节点, 能有效获得负荷扰动后系统的调速器潮流。本文在文献 [1] 和 [2] 的基础上, 计及了联络线功率的等值约束, 提出了一种新的潮流算法, 该算法设定联络线的功率运行方式, 当系统发生负荷扰动时, 可以获得维持联络线上的交换功率为定值时系统的重新潮流分布。

## 1 数学模型

对于两区域的互联电力系统, 如图 1 所示, 两区域之间通过联络线 SR 互联。

设两个区域协定的联络线上传输的功率为  $S = P_{SR} + jQ_{SR}$ , 假设功率流向由 S 至 R, 给定的约束条件

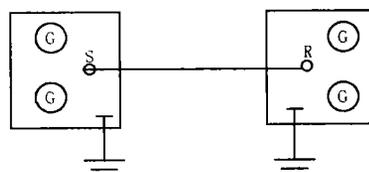


图 1 两区域系统互联简化图

Fig 1 Simplified circuit of double control area

是扰动后  $P_{SR}, Q_{SR}$  维持不变, 即扰动后, 维持联络线上的功率不变时的求解问题。求解遇到的问题是, 在求解的状态变量不变的情况下, 多了两个已知的联络线上传输的有功功率和无功功率的约束量, 此时根据已知条件所能列出的方程数目将大于求解的状态变量数。常规潮流算法求解困难, 因此, 提出以下的等值数学模型, 采用电路方法求解。

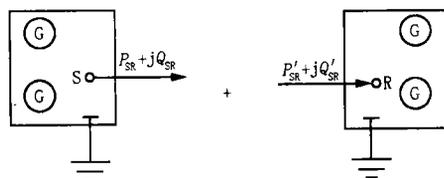


图 2 两区域等值图

Fig 1 Equivalent circuit of double control area

功率由 S 至 R 时, 对于送端区域,  $P_{SR} + jQ_{SR}$  相当于节点 S 的一个负荷功率, 对于受端区域,  $P_{SR} + jQ_{SR}$  相当于节点 R 的一个注入电源功率。此时给定联络线传输功率等值约束条件的求解将变为等值两区域的求解问题 (见图 2), 求解思路为: 对送端区域进行潮流计算, 获得 S 点电压, 再用电路求解的方法, 得到节点 R 的电压, 从而获得受端区域的潮流分布。对于受端区域, 节点 R 的电压受给定的联络线等值约束条件和送端区域的节点 S 电压两个条

件的约束,因为送端区域节点 S 的电压将受系统扰动的影响,所以在维持给定的联络线等值约束的条件下,扰动的影响将反映到受端区域的节点 R 的电压上,从而引起受端区域的潮流分布变化。

## 2 根据设定的联络线功率限制计算受端区域电压

设区域 A,区域 B 之间的联络线为 SR,见图 3, A 为送端功率侧, B 为受端功率侧, S 为送端侧节点, R 为受端侧节点。

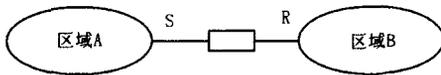


图 3 等值区域

Fig 3 Equivalent area

假设区域 A 和区域 B 协议的输送功率为  $P_{SR}$ ,  $Q_{SR}$ , 线路 SR 之间的阻抗分别为  $r_{SR}$ ,  $x_{SR}$ , 忽略对地电容。本文讨论的问题是:当系统发生扰动时,无论是区域 A 内的扰动,还是区域 B 内的扰动,如何维持区域 A 和区域 B 的交换功率  $P_{SR}$ ,  $Q_{SR}$  保持不变。

对于区域 A,假设获得送端侧节点 S 的电压,用直角坐标表示时,设 S 点电压实部为  $V_{Sx}$ , 虚部为  $V_{Sy}$ , 即  $V_S = V_{Sx} + jV_{Sy}$ , 对线路 SR, 可得简化的等值电路图 4。

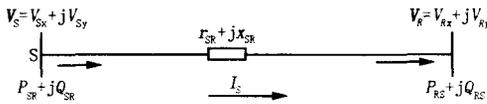


图 4 简化等值电路

Fig 4 Simplified equivalent circuit

$$P_{SR} + jQ_{SR} = V_S I_S^* \quad (1)$$

$$I_S^* = \left( \frac{P_{SR} + jQ_{SR}}{V_{Sx} + jV_{Sy}} \right)^* = \frac{P_{SR} - jQ_{SR}}{V_{Sx} - jV_{Sy}} \quad (2)$$

$$V_{Rx} + jV_{Ry} = V_{Sx} + jV_{Sy} - I_{SR} (r_{SR} + jx_{SR}) \quad (3)$$

求解式 (1) (2) (3) 得送端节点 R 电压为:

$$V_{Rx} = V_{Sx} -$$

$$\frac{V_{Sx} (P_{SR} r_{SR} + Q_{SR} x_{SR}) - V_{Sy} (P_{SR} x_{SR} - Q_{SR} r_{SR})}{V_{Sx}^2 + V_{Sy}^2} \quad (4)$$

$$V_{Ry} = V_{Sy} -$$

$$\frac{V_{Sx} (P_{SR} x_{SR} - Q_{SR} r_{SR}) + V_{Sy} (P_{SR} r_{SR} + Q_{SR} x_{SR})}{V_{Sx}^2 + V_{Sy}^2} \quad (5)$$

获得受端节点 R 的电压后,对受端系统 B,如果其本身有一个平衡节点,即 V<sub>l</sub> 节点,则对于区域 B,又多了一个电压幅值和相角都已知的 R 节点。

由 1 和 2 的数学模型可知,如果获得送端侧节点 S 的电压,根据给定的联络线上的交换功率  $P_{SR}$ ,  $Q_{SR}$ , 可以获得受端侧节点 R 的电压。对于受端区域 B,则多了一个电压幅值和相角都已知的 R 节点,即多了一个 V<sub>l</sub> 节点。如果改变系统的运行方式,使调节后受端节点 R 的电压为某一值,则可以实现扰动后维持联络线上的交换功率为设定值的目的。

其中,为获得节点 S 的电压,对区域 A 进行的潮流计算,可以采用常规潮流算法,也可采用文献 [2] 的控制潮流算法,不同的是常规潮流算法必须设置平衡节点,而考虑发电机的有功-频率和无功-电压静态特性的控制潮流算法不用设置平衡节点,只需设定某台发电机的功角为零。

另外,获得节点 R 的电压后,对区域 B 进行潮流计算时,由于多了一个平衡节点 (V<sub>l</sub> 节点),可采用文献 [1] 的多平衡节点潮流算法,也可采用文献 [2] 的控制潮流算法。对于不设平衡节点的控制潮流算法,节点 R 的电压已知时,其对应的雅克比矩阵的元素的处理方法可采用同常规潮流算法平衡节点对应雅克比矩阵元素的处理一样。

## 3 算例分析

算例采用修改的 IEEE14 节点系统,去掉一条变压器支路 5-6 和线路 9-14,其他参数不变,接线图见图 5。节点 1,2,3,4,5,7,8,9 构成区域 A,为送端系统;节点 6,10,11,12,13,14 构成区域 B,为受端系统。其中节点 9 为送端节点,节点 10 为受端节点,线路 9-10 为区域 A 和区域 B 的联络线。假设区域 A 和区域 B 的协议交换功率为  $P_{SR} = 1 \text{ pu}$ ,  $Q_{SR} = -0.1 \text{ pu}$ 。

区域 A 采用常规潮流算法,区域 B 采用文献 [2] 的多平衡节点潮流算法,潮流计算结果见表 1。

节点 1 为区域 A 的平衡节点,节点 6 为区域 B 的平衡节点,相角都为零。对 B 区域进行多平衡节点潮流算法时,因为采用的是修改后的 IEEE14 节点系统,需另外选定一个平衡节点,本文选定 B 区域的一个 PV 节点 6 为 B 区域的平衡节点。在实际电力系统中,应考虑选定的平衡节点的调节功率范围和给定合适的电压值,因为平衡节点电压的给定值直接影响 B 区域的潮流分布。表 2 中给出的算例结果满足联络线功率为预先的设定值。同时,从整个系统角度来看,多了两个设定的送端联络线功率已知量,而要求解的状态变量个数未变,如果把设定的送端功率限制用送端和受端节点电压方程

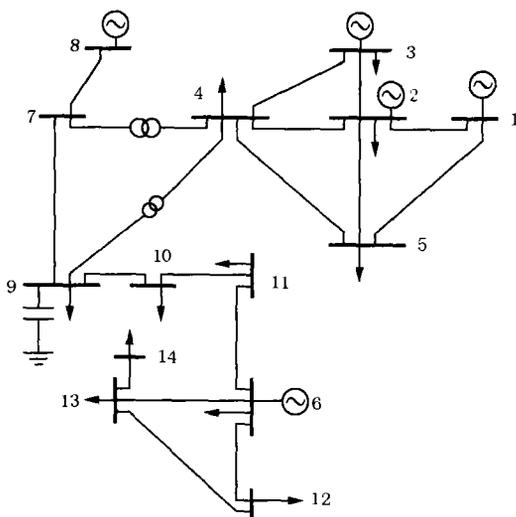


图5 修改的 IEEE14接线图

Fig 5 Connections of modified IEEE14 nodes

示,从而会出现方程数大于未知数的现象,本文提出的算法可解决这类问题。

表1 修改的 IEEE14节点潮流计算结果

Tab 1 Testing results of modified IEEE14 nodes

节点号	电压幅值	电压相角
1	1.060 000	0.000 000
2	1.045 000	-4.797 964
3	1.010 000	-11.551 729
4	1.033 758	-8.607 927
5	1.039 231	-6.931 014
6	1.070 000	0.000 000
7	1.076 818	-10.578 583
8	1.090 000	-10.578 583
9	1.079 503	-11.593 504
10	1.060 977	-15.984 253
11	1.050 112	-8.306 495
12	1.053 261	-0.750 981
13	1.040 974	-1.211 859
14	0.997 157	-3.604 591

表2 联络线 9-10的传输功率

Tab 2 Tie-line 9-10 transmitted power

母线名 $i$	母线名 $j$	$P_{ij} + jQ_{ij}$	$P_{ji} + jQ_{ji}$
9	10	$1 - j0.1$	$-0.972429 + j0.173239$

## 4 结论

针对互联电网区域间限制联络线传输功率的要求,提出了一种系统扰动后维持联络线功率为设定值的新算法。该算法对送端系统侧采用常规潮流算法计算,受端系统侧采用多平衡节点潮流算法计算,可以实现通过改变系统的运行方式,维持联络线功率为设定值的目的。同时对于基于联络线功率限制的等值约束,出现方程数大于未知数的现象时,提出了一种求解的算法,该算法物理意义清晰,容易实现,收敛性好,给出的算例验证了提出算法的可行性。

## 参考文献:

- [1] 杭乃善,姚元玺,龚婷婷.基于直角坐标注入电流形式的多平衡节点潮流算法研究[J].继电器,2005,33(4):9-11.  
HANG Nai-shan, YAO Yuan-xi, DOU Ting-ting An Algorithm of Multi-balance Bus Based on Rectangular Coordinate Current Influx[J]. Relay, 2005, 33(4): 9-11.
- [2] 杭乃善,周航,李如琦.稳态控制潮流的设定空载频率及空载电压算法[J].中国电机工程学报,2003,23(12):74-78.  
HANG Nai-shan, ZHOU Hang, LI Ru-qi Algorithm of Setting Open-circuit Frequency and Voltage for Steady State Control Power Flow[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 74-78.

收稿日期: 2005-05-24; 修回日期: 2005-09-13

## 作者简介:

姚元玺(1980-),男,工程师,研究方向为高压输电线路的规划与设计;E-mail: nnyaoyuanxi@163.com

杭乃善(1949-),男,教授,研究方向为电力系统的分析与控制。

## Power flow studies of multi-swing bus based on tie-line power equivalence constraints

YAO Yuan-xi<sup>1</sup>, HANG Nai-shan<sup>2</sup>

(1. Consultation Institute of Shandong Electric Power Engineering, Jinan 250013, China; 2. Guangxi University, Nanning 530004, China)

**Abstract:** This paper presents a new power flow algorithm based on tie-line power equivalence constraints after disturbance considering the necessary inter-area power constraints' need. The normal load flow is used in sending-area and multi-swing bus load flow is implemented on receiving-area. The method proposed aims to keep specified tie-line flow constraints unchangeable through changing the mode of operation on receiving-area. The algorithm has an obvious physical meaning and a good convergence characteristic. The results of modified IEEE14 test system show the effectiveness of the proposed algorithm.

**Key words:** tie-line; power constraint; load flow; multi-swing bus; interconnected network