

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190429

## 含线间潮流控制器的电力系统联合潮流计算

陆静<sup>1</sup>, 陈曦<sup>1</sup>, 吴熙<sup>1</sup>, 刘琦<sup>2</sup>, 陶加贵<sup>2</sup>, 徐晓轶<sup>2</sup>, 陈轩<sup>3</sup>

(1. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096; 2. 国网江苏省电力有限公司科信部, 江苏 南京 210024;  
3. 国网江苏省电力有限公司检修分公司, 江苏 南京 211102)

**摘要:** 线间潮流控制器(IPFC)能实现线路间的潮流转移和分配, 可用于解决电力系统中潮流不均引起的一系列问题, 具有较大的应用潜力和价值。为评估 IPFC 工程应用价值, 需实现含 IPFC 的大系统潮流计算, 但目前我国多用于电网规划设计的大型电力系统分析软件中没有开发 IPFC 模型。为解决上述问题, 提出了一种基于 Matlab 与 PSD-BPA 的含 IPFC 电力系统的联合潮流计算方法。首先推导了 IPFC 功率注入模型的数学表达式, 并设计了 Matlab 与 BPA 联合潮流计算的计算框架, 由 Matlab 进行 IPFC 求解计算, BPA 进行大电网潮流计算, 通过数据交换接口完成两种仿真软件的交互与交替求解。进一步对 IPFC 功率注入模型进行改进, 提出了一种基于 PI 控制器的变步长潮流迭代策略提高了计算方法的收敛性。以南通西北片电网为例, 对提出方法进行了仿真验证, 计算结果表明了提出方法的正确性和有效性。

**关键词:** 线间潮流控制器; Matlab; PSD-BPA; 联合潮流计算; PI 控制器; 潮流迭代策略

### Joint power flow calculation of power system with interline power flow controller

LU Jing<sup>1</sup>, CHEN Xi<sup>1</sup>, WU Xi<sup>1</sup>, LIU Yu<sup>2</sup>, TAO Jiagui<sup>2</sup>, XU Xiaoyi<sup>2</sup>, CHEN Xuan<sup>3</sup>

(1. School of Electric Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Department of Science and Technology, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, China; 3. Maintenance Branch of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

**Abstract:** The Interline Power Flow Controller (IPFC) can realize the transfer and distribution of power flow between lines, which can be used to solve a series of problems caused by uneven power flow in the power system, and has great potential and value for application. It is necessary to implement the power flow calculation of large-scale power system with IPFC for evaluating the application value of IPFC. However, at present, there is no IPFC model developed in large-scale power system analysis software used in power grid planning and design in China. To solve the above problem, this paper proposes a joint power flow calculation method of power system with IPFC based on Matlab and PSD-BPA. Firstly, the mathematical expression of the IPFC power injection model is derived, and the calculation framework of joint power flow calculation between Matlab and BPA is proposed. In the proposed framework, Matlab performs the calculation of IPFC, BPA performs the power flow calculation of large power grid, and the data exchange interface completes the interaction and alternate solution of two simulation software. Furthermore, the IPFC power injection model is improved, and an iterative strategy with variable step size based on the PI controller is proposed to improve the convergence of the proposed method. The proposed method is simulated and verified in the Nantong Northwest Power Grid. The results reveal the correctness and effectiveness of the proposed method.

This work is supported by Science and Technology Foundation of State Grid Corporation of China (No. SGJSJX 00YJJS1800739).

**Key words:** interline power flow controller; Matlab; PSD-BPA; joint power flow calculation; PI controller; power flow iterative strategy

## 0 引言

随着特高压交直流输电快速发展, 现代电力系

统已发展成为大规模的交直流互联系统<sup>[1-3]</sup>, 电网结构日益复杂。与此同时, 大规模的风电、光伏等可再生能源的接入, 对输电网的安全、可靠及经济运行提出了越来越高的要求。由此常常会引起电网潮流分布不均或不合理等问题, 造成电力输送过程中的个别线路负载过重、倒送与绕送、功率反复振荡,

基金项目: 国家电网公司科技项目资助(SGJSJX00YJJS 1800739)

严重影响电能质量和送电效率以及电力运营的经济性<sup>[4]</sup>。

线间潮流控制器(Interline Power Flow Controller, IPFC)是一种功能强大的柔性交流输电系统(Flexible AC Transmission System, FACTS)控制装置<sup>[5-6]</sup>。不仅能够像统一潮流控制器(Unified Power Flow Controller, UPFC)一样直接控制串联部分所安装输电线路上的潮流<sup>[7-9]</sup>,还能够实现线路间的功率交换,将重载线路潮流“搬运”至临近轻载线路,减少对其他线路的潮流影响。除此之外,IPFC甚至可以对多条有着任意相角关系、属于不同系统的线路进行潮流控制<sup>[10-12]</sup>。综上,IPFC能够动态控制电力系统的有功、无功、电压、阻抗和功角,便于优化系统运行、提高系统安全稳定性,具有非常广阔的应用前景<sup>[13-15]</sup>。

为评估 IPFC 在实际电网中的应用价值和潜力,首先应进行含 IPFC 的电力系统潮流计算。目前电力系统分析软件(PSD-BPA, 以下简称 BPA)在我国得到了广泛应用,是我国电力系统分析计算的重要工具之一,各省网公司均拥有详细的 BPA 电网数据<sup>[16-17]</sup>,在 BPA 中可以方便地进行大电网潮流计算,但目前其中尚未建立 IPFC 的仿真模型,无法实现 IPFC 的相关控制功能的仿真,这将给评估 IPFC 在实际电网中的应用价值和潜力带来极大的困难,增加了 IPFC 工程前期规划工作的难度,并严重影响规划结果的准确性。Matlab/Simulink 能够进行 IPFC 的精确建模,但数据转换与电网等值非常复杂,从而导致 Matlab 难以应用于实际大电网计算分析。因此,目前难以实现含 IPFC 的大电网潮流计算,从而导致运行规划人员难以对 IPFC 的实际应用价值进行评估,无法推动新技术的发展。

为解决上述问题,本文提出了一种基于 Matlab 和 BPA 的含 IPFC 电力系统联合潮流计算方法。首先,推导了 IPFC 的功率注入模型数学表达式,为提高联合仿真的收敛性,对 IPFC 功率注入模型进行改进,通过 PI 控制器优化 IPFC 模型注入功率的迭代步长,并利用 Matlab 编程灵活的特性实现 IPFC 模型计算及控制功能模拟。然后设计了 Matlab 与 BPA 联合潮流计算的计算框架,利用 Matlab 进行 IPFC 的求解计算,BPA 进行大电网的潮流计算,并通过由 Matlab 编程实现的数据交换接口进行两种软件的交互。最后,本文以江苏南通地区 220 kV 马塘-刘桥、220 kV 马塘-长泰两回线接入 IPFC 装置为例,对本文提出的联合潮流计算仿真方法进行实际研究与应用,验证了该方法的有效性与实用性。

## 1 IPFC 工作原理及其等效数学模型

### 1.1 IPFC 基本结构及工作原理

IPFC 通用结构示意图如图 1 所示,它由多个共用直流母线的背靠背的电压源换流器构成,且都通过换流变压器接入系统<sup>[18-22]</sup>。

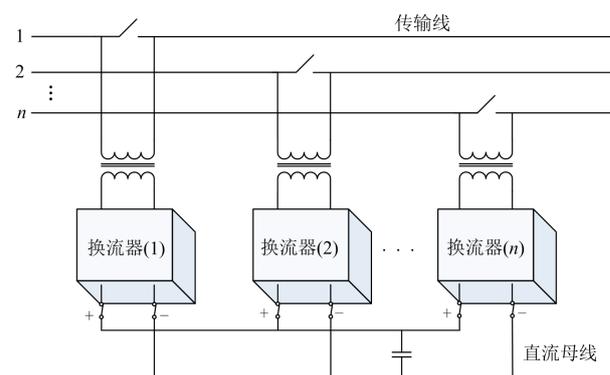


图 1 IPFC 的基本结构

Fig. 1 Basic structure of IPFC

在该种结构下,可以选择数条线路作为主控线路,一条线路作为辅控线路,主控线路各换流器可以独立控制其所在线路的有功与无功潮流,辅控线路的换流器可以控制该线路的有功或无功潮流,各换流器还可向公共直流母线提供或吸收有功功率。通过这种方式,可以在确保被控线路的潮流不越限的情况下,将过载被控线路潮流合理分配至其他轻载被控线路,这样即可有效控制被控线路潮流,确保线路不过载。

与其他 FACTS 设备相似,IPFC 自身并不产生有功功率,所以各换流器之间的有功交互处于动态平衡状态,即 IPFC 自身相对于整个系统而言,既不吸收有功功率,也不发出有功功率。

### 1.2 IPFC 功率注入模型数学推导

典型的 IPFC 可使用图 2 所示的等值电路图来表示。图中将 IPFC 的主控线路串联部分等效成一个理想电压源  $V_{seij} \angle \theta_{seij}$  和串联变压器电抗  $jX_{seij}$  的串联,辅控线路串联部分等效成一个理想电压源  $V_{seik} \angle \theta_{seik}$  和串联变压器电抗  $jX_{seik}$  的串联。理想电压源的大小  $V_{seij}$ 、 $V_{seik}$  和相角  $\theta_{seij}$ 、 $\theta_{seik}$  均可以控制。

根据图 2 所示的典型两回线接法 IPFC 等值电路,得到该 IPFC 的功率注入模型,如图 3 所示。

图 3 中:  $P_{is}$ 、 $P_{js}$ 、 $P_{ks}$  分别代表 IPFC 对  $i, j, k$  节点的注入有功功率;  $Q_{is}$ 、 $Q_{js}$ 、 $Q_{ks}$  分别代表 IPFC 对  $i, j, k$  节点的注入无功功率;  $P_{ij}+jQ_{ij}$ 、 $P_{ik}+jQ_{ik}$  分别是 IPFC 主控线路和辅控线路的潮流;  $P_{i0}+jQ_{i0}$ 、 $P_{k0}+jQ_{k0}$  分别是 IPFC 主控线路和辅控线路不含 IPFC

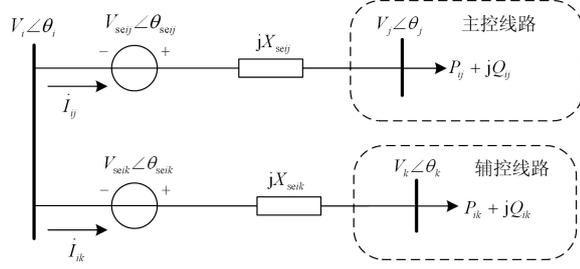


图 2 典型 IPFC 的等值电路图

Fig. 2 Equivalent circuit of typical IPFC

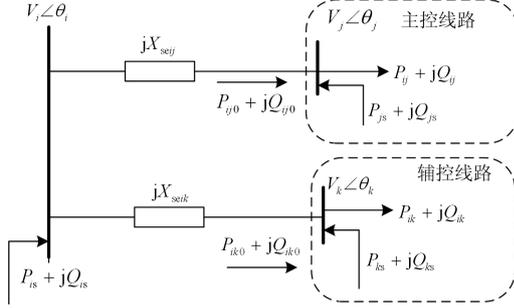


图 3 典型 IPFC 的功率注入模型

Fig. 3 Power injection model of typical IPFC

时的自然潮流, 只与节点  $i$ 、 $j$  和  $k$  的电压大小与相角有关。表达式如下:

$$P_{ij0} = V_i V_j \sin \theta_{ij} / X_{seij} \quad (1)$$

$$Q_{ij0} = (V_i V_j \cos \theta_{ij} - V_j^2) / X_{seij} \quad (2)$$

$$P_{ik0} = V_i V_k \sin \theta_{ik} / X_{seik} \quad (3)$$

$$Q_{ik0} = (V_i V_k \cos \theta_{ik} - V_k^2) / X_{seik} \quad (4)$$

式中,  $\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$ 、 $\theta_{ik} = \theta_i - \theta_k$ , 下同。

将  $V_{seij} \angle \theta_{seij}$  以  $j$  节点为参考,  $V_{seik} \angle \theta_{seik}$  以  $k$  节点为参考进行  $pq$  轴分解, 可以得到 IPFC 功率注入模型的各附加注入功率:

$$P_{is} = -V_i (V_{seijq} \cos \theta_{ij} - V_{seijp} \sin \theta_{ij}) / X_{seij} - V_i (V_{seikq} \cos \theta_{ik} - V_{seikp} \sin \theta_{ik}) / X_{seik} \quad (5)$$

$$Q_{is} = -V_i (V_{seijp} \cos \theta_{ij} + V_{seijq} \sin \theta_{ij}) / X_{seij} - V_i (V_{seikp} \cos \theta_{ik} + V_{seikq} \sin \theta_{ik}) / X_{seik} \quad (6)$$

$$P_{js} = V_j V_{seijq} / X_{seij} \quad (7)$$

$$Q_{js} = V_j V_{seijp} / X_{seij} \quad (8)$$

$$P_{ks} = V_k V_{seikq} / X_{seik} \quad (9)$$

$$Q_{ks} = V_k V_{seikp} / X_{seik} \quad (10)$$

式中:  $V_{seijp}$ 、 $V_{seijq}$  分别是  $V_{seij} \angle \theta_{seij}$  的  $p$  轴分量和  $q$  轴分量, 它们之间的关系见式(11)、式(12);  $V_{seikp}$ 、 $V_{seikq}$  分别是  $V_{seik} \angle \theta_{seik}$  的  $p$  轴分量和  $q$  轴分量, 它们之间的关系见式(13)、式(14)。

$$V_{seij} = \sqrt{V_{seijp}^2 + V_{seijq}^2} \quad (11)$$

$$\theta_{seij} = \arctan(V_{seijq} / V_{seijp}) + \theta_j \quad (12)$$

$$V_{seik} = \sqrt{V_{seikp}^2 + V_{seikq}^2} \quad (13)$$

$$\theta_{seik} = \arctan(V_{seikq} / V_{seikp}) + \theta_k \quad (14)$$

根据 IPFC 自身换流器有功交换平衡, 可以得到式(15)。

$$(V_{seijp} V_i \sin \theta_{ij} - V_{seijq} (V_i \cos \theta_{ij} - V_j)) / X_{seij} + (V_{seikp} V_i \sin \theta_{ik} - V_{seikq} (V_i \cos \theta_{ik} - V_k)) / X_{seik} = 0 \quad (15)$$

式(5)一(10)、式(15)即为 IPFC 功率注入模型数学表达式。

## 2 Matlab 与 BPA 联合仿真实现含 IPFC 电力系统潮流计算

### 2.1 含 IPFC 电力系统联合潮流计算框架

本文提出了一种含 IPFC 电力系统的联合潮流计算框架, 该框架如图 4 所示。两种仿真软件联合潮流计算的方式为, 在 Matlab 中进行 IPFC 求解计算, 在 BPA 中进行电网潮流计算, 通过在 Matlab 中编制的接口进行两种仿真软件的交互: 数据交换接口从 PFO 文件中读取输入信息, 并将输入信息传递给 Matlab 中的 IPFC 计算程序执行 IPFC 的求解计算, 计算完成后, IPFC 计算程序将输出信息传递给数据交换接口, 并通过数据交换接口将输出信息写入 BPA 的 DAT 文件中的相应位置, 然后利用数据交换接口调用 BPA 的潮流计算程序, 对 DAT 文件进行潮流计算, 生成新的 PFO 文件。两种软件通过数据接口的上述交互, 可实现 Matlab 与 BPA 的交替求解, 直至 IPFC 计算程序判断收敛条件满足后, 计算结束, 并由 Matlab 给出计算收敛时的 IPFC 控制参数。

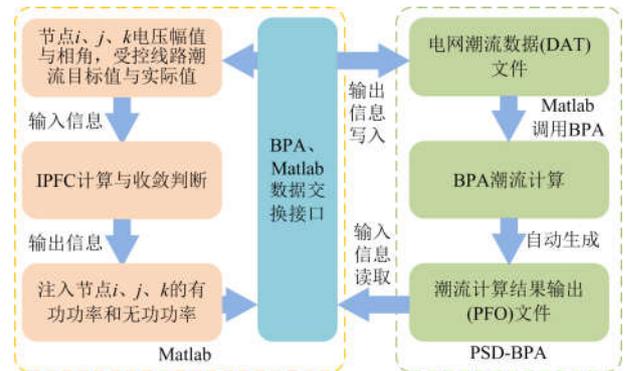


图 4 含 IPFC 电力系统联合潮流计算框架

Fig. 4 Framework of joint power flow calculation of power system with IPFC

使用典型两回线接法拓扑的 IPFC, 数据交换接口从 PFO 文件中读取的输入信息分别为节点  $i$ 、 $j$ 、 $k$  的电压幅值和相角和受控线路潮流, 输出信息为 Matlab 计算出的注入节点  $i$ 、 $j$ 、 $k$  的有功功率和无功功率。此处注入功率按照节点  $i$ 、 $j$ 、 $k$  处的附加等效发电机处理, 作为发电机的有功与无功出力写入到 DAT 文件中节点  $i$ 、 $j$ 、 $k$  对应卡片的相应位置。

下面以两回线接法 IPFC 为例, 给出 Matlab 中根据控制目标对 IPFC 功率注入模型进行求解计算的原理。加入 IPFC 后的主控线路潮流  $P_{ij}+jQ_{ij}$  与  $j$  侧注入功率  $P_{js}+jQ_{js}$  和自然潮流  $P_{ij0}+jQ_{ij0}$  的关系为

$$P_{js} = P_{ij} - P_{ij0} \quad (16)$$

$$Q_{js} = Q_{ij} - Q_{ij0} \quad (17)$$

辅控线路潮流  $P_{ik}+jQ_{ik}$  与  $k$  侧注入功率  $P_{ks}+jQ_{ks}$  和自然潮流  $P_{ik0}+jQ_{ik0}$  的关系为

$$P_{ks} = P_{ik} - P_{ik0} \quad (18)$$

$$Q_{ks} = Q_{ik} - Q_{ik0} \quad (19)$$

给定主控线路  $ij$  潮流的控制目标值  $P_{ijref}+jQ_{ijref}$  以及辅控线路  $ik$  有功潮流的控制目标值  $P_{ikref}$  后, 可以将  $P_{ijref}$ 、 $Q_{ijref}$ 、 $P_{ikref}$  分别代入式(16)、式(17)、式(18)中替换  $P_{ij}$ 、 $Q_{ij}$ 、 $P_{ik}$ , 并求出  $j$  侧节点的注入功率  $P_{js}+jQ_{js}$  以及  $k$  侧节点的注入有功  $P_{ks}$ 。由式(7)一式(9)可知, 如果知道  $P_{js}$ 、 $Q_{js}$ 、 $P_{ks}$ , 可直接求出  $V_{seijp}$ 、 $V_{seijq}$  和  $V_{seikp}$ , 再根据式(15)可以求出  $V_{seikq}$ , 进而根据式(5)、式(6)、式(10)可以求出  $P_{is}$ 、 $Q_{is}$ 、 $Q_{ks}$ 。

在 Matlab 中输入控制目标, 再利用数据交换接口读取 PFO 文件中的输入信息, 将其代入式(5)一式(10)、式(15)、式(16)一式(18), 完成 IPFC 输出信息  $P_{is}$ 、 $Q_{is}$ 、 $P_{js}$ 、 $Q_{js}$ 、 $P_{ks}$ 、 $Q_{ks}$  的计算, 并将输出信息传给数据交换接口, 由数据交换接口将输出信息写入到 DAT 文件中, 再由 BPA 的潮流计算程序对 DAT 文件进行计算, 完成一次 Matlab 与 BPA 之间的交互。如此反复交互直至计算收敛。

其收敛条件为

$$\begin{cases} |P_{ijref} - P_{ij}| < \varepsilon \\ |Q_{ijref} - Q_{ij}| < \varepsilon \\ |P_{ikref} - P_{ik}| < \varepsilon \end{cases} \quad (20)$$

式中,  $\varepsilon$  为收敛精度。

计算完成后, 将求得的  $V_{seijp}$ 、 $V_{seijq}$ 、 $V_{seikp}$ 、 $V_{seikq}$  代入式(11)一式(14), 求得 IPFC 的控制参数  $V_{seij}$ 、 $V_{seik}$ 、 $\theta_{seij}$ 、 $\theta_{seik}$ 。根据上述分析, Matlab 与 BPA 联合计算框架下实现 IPFC 潮流控制功能的流程图见图 5, 图中  $n$  为当前迭代次数, 下同。

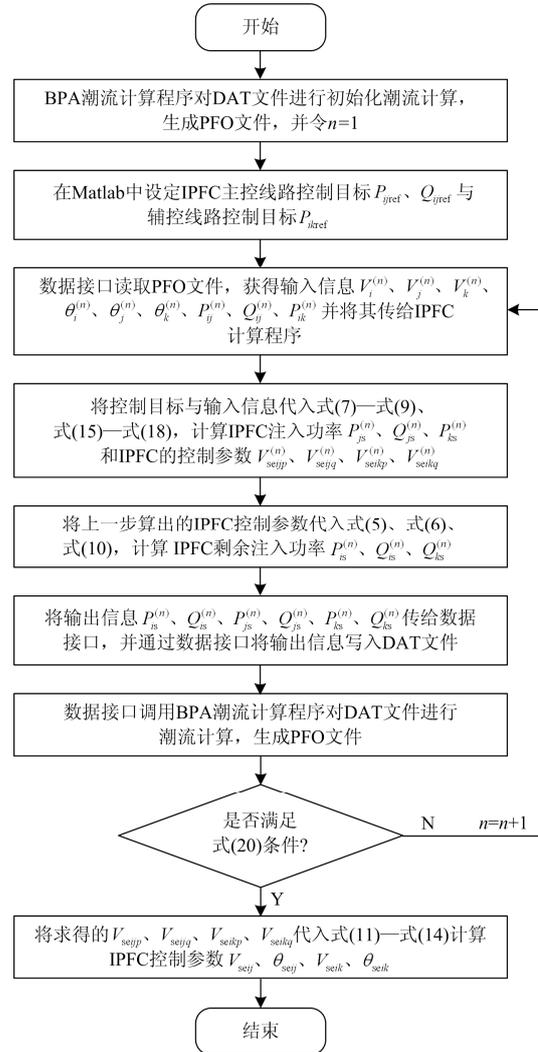


图 5 Matlab 与 BPA 联合计算框架下实现 IPFC 潮流控制功能流程图

Fig. 5 Flowchart of implementing IPFC power flow control function under framework of joint calculation between Matlab and BPA

## 2.2 IPFC 模型的变步长潮流迭代策略

前文在联合潮流计算框架下采用传统方法对 IPFC 功率注入模型进行建模, 通过控制目标与对应被控线路不含 IPFC 时的自然潮流之差(见式(16)一式(18))作为相应注入功率并通过迭代不断修正的方法实现 IPFC 的潮流控制功能。但是传统方法具有收敛性差的缺点, 本文为提高含 IPFC 电力系统联合潮流计算的收敛性, 通过 PI 控制器改变 IPFC 模型注入功率的迭代步长, 优化潮流计算的收敛性。下面以两回线接法 IPFC 为例, 阐述求解计算的原理。

联合仿真框架下提高潮流迭代收敛性的关键是减少 IPFC 注入功率的修正次数, 使其尽快达到将

IPFC 被控线路潮流控制在指定值时所需注入功率值。观察式(7)一式(9)可知,如果求得  $P_{js}$ 、 $Q_{js}$ 、 $P_{ks}$ , 则可以分别求出 IPFC 的控制参数  $V_{seijp}$ 、 $V_{seijq}$ 、 $V_{seikq}$ , 将  $V_{seijp}$ 、 $V_{seijq}$ 、 $V_{seikq}$  代入式(15)可以求得 IPFC 控制参数  $V_{seikp}$ 。将 IPFC 控制参数代入式(5)、式(6)、式(10)则可以求出  $P_{is}$ 、 $Q_{is}$ 、 $Q_{ks}$ , 此时 IPFC 的所有注入功率均将求得。所以,可以采用 PI 控制器,根据被控线路潮流与其控制目标,对注入功率  $P_{js}$ 、 $Q_{js}$ 、 $P_{ks}$  进行求解,并通过 PI 控制器参数的整定提高联合计算的收敛性。基于 PI 控制器的 IPFC 注入功率求解控制框图如图 6 所示。

图 6 中:  $P_{ijref}$ 、 $Q_{ijref}$  分别为主控线路  $ij$  的有功潮流目标值与无功潮流目标值;  $P_{ikref}$  为辅控线路  $ik$  的有功潮流目标值;  $K_{PjP}$ 、 $K_{QjP}$ 、 $K_{PkP}$  分别为各 PI 控制器的比例控制参数;  $K_{PjI}$ 、 $K_{QjI}$ 、 $K_{PkI}$  分别为各 PI 控制器的积分控制参数;  $s$  为拉普拉斯变换算子。

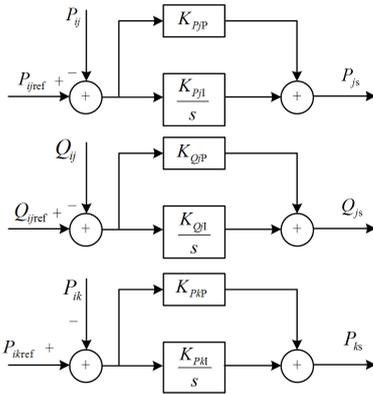


图 6 基于 PI 控制器的 IPFC 注入功率求解框图  
Fig. 6 Block diagram of IPFC injection power calculation based on PI controller

采用 PI 控制器求解 IPFC 模型注入功率后,  $P_{js}$ 、 $Q_{js}$ 、 $P_{ks}$  用于第  $n$  次迭代计算的离散形式数学表达式见式(21)一式(23)。

$$P_{js}^{(n)} = K_{PjP}(P_{ijref} - P_{ij}^{(n)}) + K_{PjI} \sum_{t=1}^n (P_{ijref} - P_{ij}^{(t)}) \quad (21)$$

$$Q_{js}^{(n)} = K_{QjP}(Q_{ijref} - Q_{ij}^{(n)}) + K_{QjI} \sum_{t=1}^n (Q_{ijref} - Q_{ij}^{(t)}) \quad (22)$$

$$P_{ks}^{(n)} = K_{PkP}(P_{ikref} - P_{ik}^{(n)}) + K_{PkI} \sum_{t=1}^n (P_{ikref} - P_{ik}^{(t)}) \quad (23)$$

与传统方法类似,给定主控线路  $ij$  潮流控制目标  $P_{ijref} + jQ_{ijref}$  与辅控线路  $ik$  有功潮流控制目标  $P_{ikref}$  后, Matlab 再利用数据交换接口读取 PFO 文件中的输入信息,即可通过式(21)一式(23)求得  $P_{js}$ 、 $Q_{js}$ 、 $P_{ks}$ ,进而可以求出 IPFC 的所有控制参数  $V_{seijp}$ 、 $V_{seijq}$ 、 $V_{seikp}$ 、 $V_{seikq}$  和其余注入功率  $P_{is}$ 、 $Q_{is}$ 、 $Q_{ks}$ 。此时,

Matlab 完成了 IPFC 所有输出信息  $P_{is}$ 、 $Q_{is}$ 、 $P_{js}$ 、 $Q_{js}$ 、 $P_{ks}$ 、 $Q_{ks}$  的计算,并将输出信息传给数据交换接口,由数据交换接口将输出信息写入到 DAT 文件中,再调用 BPA 的潮流计算程序对 DAT 文件进行计算,完成一次 Matlab 与 BPA 之间的交互。如此反复交互直至计算满足收敛条件,其收敛条件同式(20)。

根据上述分析,只需在图 5 联合计算框架的基础上,在步骤二中添加 PI 控制器参数值设定,并将步骤四中控制目标与输入信息改为代入式(21)一式(23)、式(15)一式(18),即可实现基于 PI 控制器的变步长潮流迭代策略。

策略中所用 PI 控制器参数整定的经验如下:

- 1) 若 PI 控制器参数设置的较小,则潮流计算收敛速度的提升比较有限,但并不会导致潮流不收敛;
- 2) 若收敛速度较慢,可适当增大积分环节控制参数,增大比例环节控制参数;
- 3) 比例环节控制参数取值较大时,被控量容易发生超调,可适当减小比例环节控制参数;
- 4) 若被控量在收敛过程中振荡比较频繁,可适当减小比例环节控制参数,减小积分环节控制参数;
- 5) 根据本文大量调试工作的经验,建议积分环节参数取 0.5~3,比例环节控制器参数取 1~10;
- 6) 在同一个网架(或算例)下,只需要整定一次 PI 控制器参数,电网运行方式的变化对 PI 控制器的效果影响并不大。

### 2.3 算例分析

在江苏省南通市西北片 220 kV 电网中装设 IPFC 验证本文所提联合仿真方法的正确性和有效性,电网运行方式选择 2020 年夏季低谷风电大发运行方式。计算时所用 DAT 文件包含整个华东电网数据,共计 7 195 个节点、708 台发电机,IPFC 所在南通西北片 220 kV 电网为其中一部分。图 7 所示为 IPFC 装设点附近电网结构图。

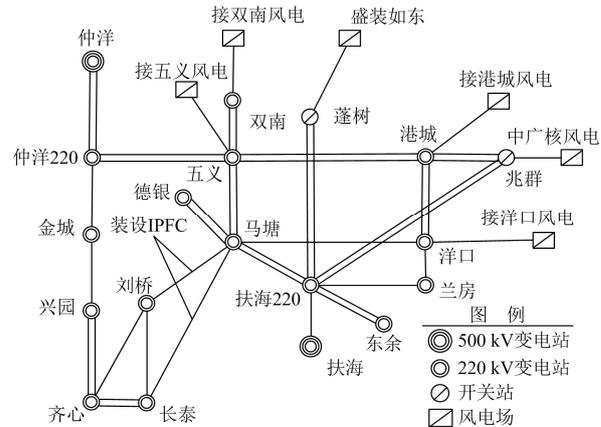


图 7 IPFC 装设点附近电网结构图

Fig. 7 Network near IPFC installation point

IPFC 采用典型两回线接法, 两个串联侧分别安装在 220 kV 马塘-刘桥、220 kV 马塘-长泰线路的马塘侧。马塘-长泰为主控线路, 马塘-刘桥为辅控线路。具体接法见图 8。

如图 8 所示, 在 DAT 文件中添加 IPFC 串联耦合变压器卡片以及串联变压器出口处的虚拟母线卡片, 主控线路虚拟母线为 IPFC1, 辅控线路虚拟母线为 IPFC2。马塘 220 kV 母线与虚拟母线 IPFC1、IPFC2 作为功率注入节点。

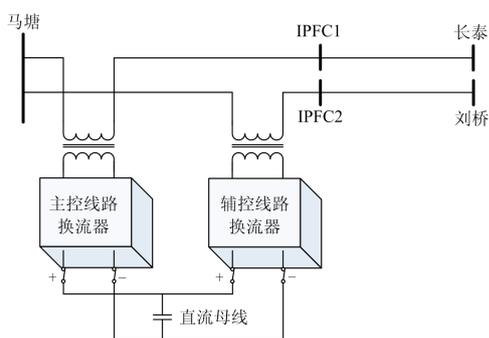


图 8 本文算例 IPFC 接法示意图

Fig. 8 Schematic diagram of IPFC connection in this example

IPFC 主控线路串联耦合变压器注入电压最大值  $V_{seij\_max}=0.15$  p.u., 串联耦合变压器内电抗  $X_{seij}=0.003$  p.u., 辅控线路串联耦合变压器注入电压

最大值  $V_{seik\_max}=0.15$  p.u., 串联耦合变压器内电抗  $X_{seik}=0.003$  p.u.。基于 PI 控制器的变步长潮流迭代策略中各 PI 控制器参数取值为  $K_{PjP}=K_{QjP}=K_{PKP}=5$ 、 $K_{PjI}=K_{QjI}=K_{PKI}=1$ 。

未安装 IPFC 时, 正常运行方式下, 马塘-长泰线路潮流  $P_{ij}=2.81$  p.u.,  $Q_{ij}=-0.30$  p.u., 马塘-刘桥线路潮流  $P_{ik}=3.53$  p.u.,  $Q_{ik}=-0.17$  p.u.。当 220 kV 五义-仲洋线路 N-1 时, 马塘-长泰线路潮流  $P_{ij}=3.32$  p.u.,  $Q_{ij}=-0.33$  p.u., 马塘-刘桥线路潮流  $P_{ik}=4.13$  p.u.,  $Q_{ik}=-0.19$  p.u.。此时马塘-刘桥线路有功潮流超过其线路限额 4.0 p.u., 需要使用 IPFC 对其潮流进行调节。

安装 IPFC 后, 分别在正常运行方式和 N-1 运行方式下, 改变 IPFC 主控线路控制目标  $P_{ijref}+jQ_{ijref}$  与辅控线路控制目标值  $P_{ikref}$ , 观察 IPFC 的控制效果以及对电网潮流的调节作用。其中, 算例 1~3 为电网正常运行方式, 算例 4~6 为五义-仲洋线路 N-1 运行方式。使用本文提出的基于 Matlab 与 BPA 的联合仿真方法进行含 IPFC 电力系统潮流计算, 分别基于传统方法与本文提出的基于 PI 控制器的变步长潮流迭代策略实现 IPFC 的潮流控制功能, IPFC 控制精度为  $10^{-3}$ 。潮流计算结果如表 1 所示。IPFC 在将线路潮流控制到指定值时的控制参数如表 2 所示。

表 1 含 IPFC 的南通西北片电网潮流

Table 1 Power flow of power grid in the northwest of Nantong with IPFC

算例	控制目标		基于变步长潮流迭代策略控制结果			基于传统方法控制结果		
	主控线路	辅控线路	主控线路	辅控线路	迭代	主控线路	辅控线路	迭代
	$P_{ijref} + jQ_{ijref}$	$P_{ikref}$	$P_{ij} + jQ_{ij}$	$P_{ik} + jQ_{ik}$	次数	$P_{ij} + jQ_{ij}$	$P_{ik} + jQ_{ik}$	次数
1	3.00+j1.00	2.00	3.0001+j1.0003	2.0000-j1.2702	52	3.0002+j1.0002	2.0003-j1.2700	527
2	2.00+j0.50	3.50	2.0002+j0.4999	3.4998-j0.8348	44	2.0006+j0.5003	3.5003-j0.8353	499
3	1.00+j0.30	1.00	1.0001+j0.3001	1.0001-j0.4265	82	—	—	不收敛
4	3.00+j1.00	4.00	3.0002+j1.0001	4.0001-j1.4243	73	3.0001+j0.9997	4.0001-j1.4245	476
5	4.00+j1.00	1.00	4.0003+j1.0002	1.0002-j1.3210	42	4.0002+j1.0001	1.0004-j1.3208	462
6	2.00+j1.00	3.00	1.9999+j1.0001	3.0001-j1.2977	59	2.0004+j1.0003	2.9998-j1.2974	487

表 2 IPFC 控制参数

Table 2 Control parameters of IPFC

算例	IPFC 注入功率			IPFC 控制参数				IPFC 换流器吸收功率	
	马塘侧	IPFC1 侧	IPFC2 侧	$V_{seij}$	$\theta_{seij}$	$V_{seik}$	$\theta_{seik}$	主控线路换流器	辅控线路换流器
				p.u., 弧度					
1	24.4921-j1.8240	-7.8544+j13.9124	-16.6308-j10.0809	0.046 2	0.704 3	0.060 1	-0.923 7	0.138 4	-0.138 4
2	13.9235-j1.4067	-12.8394+j7.8947	-1.0843-j5.6711	0.044 3	0.181 3	0.017 6	-1.722 2	0.064 1	-0.064 1
3	92.5881+j6.2994	-45.9782+j7.6491	-46.6102-j0.6562	0.138 1	-0.262 8	0.141 4	-0.446 9	0.062 8	-0.062 8
4	4.8963-j1.5662	-6.6378+j13.4568	1.7417-j10.9247	0.043 5	0.774 0	0.034 2	4.236 6	0.131 4	-0.131 4
5	52.2792+j1.6090	-12.9056+j14.5779	-39.3735-j9.6623	0.056 3	0.514 6	0.125 9	-0.649 1	0.198 2	-0.198 2
6	55.9129+j0.0150	-33.45+j14.7623	-22.4628-j8.8622	0.106 0	0.031 6	0.074 4	-0.735 3	0.176 4	-0.176 4

由表 1 可知,使用本文提出的基于 Matlab 与 BPA 的联合仿真方法进行含 IPFC 电力系统潮流计算,可以实现 IPFC 的潮流控制功能。且本文在 Matlab 中所建立的 IPFC 功率注入模型可以很好地将 BPA 中大电网线路的潮流控制在指定值。结合表 2 中的 IPFC 换流器吸收功率平衡可知表 1 控制结果的正确性。但是,由表 1 可以看出,基于传统方法进行 IPFC 潮流控制,计算收敛性差,迭代次数多,甚至会出现计算不收敛的情况(算例 3)。而基于本文所提出的变步长潮流迭代策略进行 IPFC 潮流控制,联合计算的收敛性相比传统方法大大提高。表 2 中的结果为联合仿真结束时 Matlab 计算生成,其中的 IPFC 控制参数以及 IPFC 换流器吸收功率结果可以作为规划人员对 IPFC 换流器容量、串联耦合变压器参数选择的依据。综合上述分析,本文提出的基于 Matlab 与 BPA 的含 IPFC 电力系统潮流计算联合仿真方法是正确且有效的,并且该方法解决了现有电力系统分析商业软件中没有提供 IPFC 模型,导致规划人员难以对 IPFC 的实际应用价值进行评估的问题,可以为规划人员进行 IPFC 的应用价值评估以及 IPFC 项目前期规划提供分析依据。

### 3 结论

本文针对现有大电网分析软件难以实现含 IPFC 的大电网潮流计算的问题,提出了一种基于 Matlab 与 PSD-BPA 两种仿真软件的含 IPFC 电力系统联合潮流计算方法。所得结论如下:

(1) 通过 Matlab 与 PSD-BPA 软件的数据交互,可以方便地实现含 IPFC 的大电网潮流计算。由于各省网公司均拥有详细的 BPA 电网数据,该计算方法可为规划人员对 IPFC 的应用价值和潜力进行评估提供分析依据。

(2) 相比于传统的建模方法,采用本文提出的基于 PI 控制器的变步长潮流迭代策略对 IPFC 模型进行改进后,联合潮流计算框架下的潮流计算具有更好的收敛性。

(3) 仿真算例验证了含线间潮流控制器的电力系统联合潮流计算方法的准确性,并且也一定程度上体现了 IPFC 的控制能力及应用价值。

(4) 本文提出的联合计算框架还具有一定的扩展性,利用 Matlab 编程的灵活性,可以在大电网中实现不同拓扑结构和控制模式的 IPFC 的控制功能,甚至可以实现不同 FACTS 设备的控制功能,值得进一步研究。

### 参考文献

- [1] 李国庆, 宋莉, 李筱婧. 计及 FACTS 装置的可用输电能力计算[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(19): 36-42.  
LI Guoqing, SONG Li, LI Xiaojing. Available transfer capability calculation considering FACTS controllers[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(19): 36-42.
- [2] 范璇, 张玉红, 苏丽宁, 等. 多直流馈入受端电网短路电流控制水平研究[J]. 智慧电力, 2018, 46(3): 61-67.  
FAN Xuan, ZHANG Yuhong, SU Lining, et al. Research on short circuit current control in multi-infeed DC receiving power grid[J]. Smart Power, 2018, 46(3): 61-67.
- [3] 吴小珊, 涂亮, 柳勇军, 等. 同步和异步运行电网暂态电压稳定性分析[J]. 智慧电力, 2018, 46(3): 1-8.  
WU Xiaoshan, TU Liang, LIU Yongjun, et al. Transient voltage stability analysis of AC/DC hybrid power grid with synchronous and asynchronous operation[J]. Smart Power, 2018, 46(3): 1-8.
- [4] 武智慧. 考虑统一潮流控制器的电力系统优化潮流研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2013.  
WU Zhihui. Research on power system optimal power flow with considering unified power flow controller[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2013.
- [5] GYUGYI L, SEN K K, SCHAUDER C D. The interline power flow controller concept: a new approach to power flow management in transmission systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(3): 1115-1123.
- [6] KAMEL S, JURADO F. Power flow analysis with easy modelling of interline power flow controller[J]. Electric Power Systems Research, 2014, 108(3): 234-244.
- [7] 蔡晖, 杨健, 彭竹奕, 等. 基于 PSS/E 的 MMC-UPFC 机电暂态仿真方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(19): 118-125.  
CAI Hui, YANG Jian, PENG Zhuyi, et al. Electromechanical transient simulation method for MMC-UPFC in PSS/E[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(19): 118-125.
- [8] 周绍元, 李志勇, 陈卓, 等. 适用于 UPFC 多个控制策略间平滑切换的建模[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(16): 97-102.  
ZHOU Shaoyuan, LI Zhiyong, CHEN Zhuo, et al. Modeling of smooth handoff suitable for UPFC between multiple control strategies[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(16): 97-102.

- [9] 陆海强, 王金跃, 钱进. 模块化限流式统一潮流控制器的改进调制与控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(14): 136-142.  
LU Haiqiang, WANG Jinyue, QIAN Jin. Modified modulation and control strategy of unified power flow controller based on modular multilevel converters with solid state fault current limiter[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(14): 136-142.
- [10] AZBE V, MIHALIC R. The control strategy for an IPFC based on the energy function[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(4): 1662-1669.
- [11] 吴熙, 王亮, 陈曦, 等. 计及线间潮流控制器的电力系统潮流优化[J]. 电网技术, 2019, 43(11): 4125-4132.  
WU Xi, WANG Liang, CHEN Xi, et al. Optimal power flow considering interline power flow controller[J]. Power System Technology, 2019, 43(11): 4125-4132.
- [12] BHOWMICK S, DAS B, KUMAR N. An indirect IPFC model to enhance reusability of Newton power-flow codes[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(4): 2079-2088.
- [13] 高伯阳, 吴熙, 王亮, 等. 线间潮流控制器技术现状分析及展望[J]. 浙江电力, 2019, 38(2): 7-14.  
GAO Boyang, WU Xi, WANG Liang, et al. Technical status and prospect of interline power flow controller[J]. Zhejiang Electric Power, 2019, 38(2): 7-14.
- [14] BABU A V N, SIVANAGARAJU S, PADMANABHARAJU C, et al. Power flow analysis of a power system in the presence of interline power flow controller (IPFC)[J]. Journal of Engineering & Applied Sciences, 2010, 5(10): 1-4.
- [15] ZHANG X P. Robust modeling of the interline power flow controller and the generalized unified power flow controller with small impedances in power flow analysis[J]. Electrical Engineering, 2006, 89(1): 1-9.
- [16] 郭文鑫, 余志文, 赵峰, 等. 应用于 EMS 高级应用系统的 BPA 程序快速调用方法与接口设计[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(11): 61-66.  
GUO Wenxin, YU Zhiwen, ZHAO Feng, et al. An interface applied on advanced application system in EMS for calling BPA transient calculation program quickly and effectively[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(11): 61-66.
- [17] 于生宝, 贾丽婷. 基于潮流计算对电能质量的研究[J]. 电测与仪表, 2015, 52(7): 1-4.  
YU Shengbao, JIA Liting. Power quality study based on flow calculation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015, 52(7): 1-4.
- [18] BHOWMICK S, DAS B, KUMAR N. An advanced IPFC model to reuse Newton power flow codes[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(2): 525-532.
- [19] BABU D S, SAHU N, VENKATARAMU P S, et al. Development of a new model of IPFC for power flow in multi-transmission lines[J]. International Journal of Computer Applications, 2014, 84(5): 33-37.
- [20] ZHANG Y, ZHANG Y, CHEN C. A novel power injection model of IPFC for power flow analysis inclusive of practical constraints[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(4): 1550-1556.
- [21] WEI X, CHOW J H, FARDANESH B, et al. A common modeling framework of voltage-sourced converters for load flow, sensitivity, and dispatch analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(2): 934-941.
- [22] BABU A V N, SIVANAGARAJU S, PADMANABHARAJU C, et al. Power flow analysis of a power system in the presence of interline power flow controller(IPFC)[J]. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 2010, 5(10): 1-4.

收稿日期: 2019-04-17; 修回日期: 2019-06-12

作者简介:

陆静(1985—), 女, 硕士, 工程师, 从事电力系统稳定与控制研究; E-mail: wendycat163@163.com

陈曦(1991—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: 592234385@qq.com

吴熙(1987—), 男, 博士, 副教授, 主要从事电力系统振荡分析与控制、柔性交流输电系统、分布式控制等方面的研究。E-mail: wuxi112233@163.com

(编辑 姜新丽)