

# 节点约束统一的互补潮流模型及其应用

郑浩<sup>1,2</sup>, 赵晋泉<sup>1,2</sup>, 杨乘胜<sup>2,3</sup>, 陈刚<sup>1,2</sup>

(1. 河海大学 教育部可再生能源发电技术研究中心, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学 能源与电气学院, 江苏 南京 210098; 3. 国电南京自动化股份有限公司, 江苏 南京 211100)

**摘要:** 提出一种节点约束统一的互补潮流模型。区别于常规启发式判断校正结构, 牛顿迭代过程中自适应地辨析压控节点无功越限并渐进校正, 避免由于采用错误的 PV-PQ 转换逻辑导致潮流计算失败或收敛于错误解。通过归一化非线性互补逼近函数描述无功电压约束特性, 保持潮流计算雅可比矩阵整体结构, 较好地解决互补潮流模型可微性和复杂性的问题, 同时提供潮流节点类型识别性发散的一种数值化表现形式。在此基础上构建互补约束连续潮流, 采用通用型临界点数值识别方法有效辨别临界点分岔类型和关键约束。通过多个测试算例验证了所提模型与方法的有效性。

**关键词:** 节点类型转换; 互补约束; 潮流模型; 连续潮流; 电压稳定; 模型; 电力系统; 稳定性

**中图分类号:** TM 744

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.02.020

## 0 引言

潮流计算作为电力系统分析必不可少的工具, 已得到广泛的研究与应用<sup>[1-2]</sup>。潮流计算中必须充分计及系统元件特性以获得更加合理可行的潮流结果<sup>[3-6]</sup>。电力系统中发电机等无功源设备具有系统电压维持能力, 当其无功越限时便难以维持设定电压。此类节点无功和电压之间呈现互补约束关系。常规潮流计算方法中通过 PV-PQ 节点类型转换逻辑<sup>[7]</sup>处理此类问题, 需启发式判断校正无功越限情况, 在大规模系统中逻辑实施时机对潮流收敛性有重要影响, 经验性较强而稳定性欠佳。

互补约束能够描述不可微关系<sup>[8-9]</sup>。潮流计算中, 节点类型转换解点即为典型的连续不可微点, 可通过互补约束加以描述。相关文献中处理此类问题的方法可归结为 2 类。第 1 类为非线性规划方法。此类方法通过非线性规划(特殊最优潮流)处理互补约束潮流问题。文献<sup>[10]</sup>基于互补理论构建潮流计算的混合互补非线性规划模型, 采用现代内点算法加以求解, 通过互补松弛解决临界互补时海森矩阵的奇异问题。文献<sup>[11]</sup>将潮流计算构造为混合互补优化问题, 从技术层面指出牛顿潮流迭代计算等价于其广义简约梯度法的求解步骤。此类方法能够提高病态情形下计算可靠性, 但一般需形成二阶海森矩

阵, 计算量和迭代次数较常规潮流均大幅增加, 不适用于大型电网工程应用。第 2 类为光滑化牛顿法。该方法旨在牛顿法潮流计算基础上通过非线性互补方程描述无功电压约束特性, 求解时需计及互补方程的非光滑性, 此外节点无功上下限约束的表达形式也直接影响互补潮流模型的复杂程度。文献<sup>[12]</sup>采用双曲线函数或 Sigmoid 函数描述压控节点无功电压调控特性, 以保证潮流方程的可微性, 其本质在于采用光滑逼近函数描述无功电压互补约束关系。文献<sup>[13]</sup>探讨节点类型转换逻辑的互补约束描述形式, 并将其光滑化处理引入潮流方程模型中加以求解。由于单个节点上下限互补约束的存在, 需增加 3 个变量和方程, 导致其互补潮流模型复杂性提高, 亦不便于在现有潮流算法上拓展应用。文献<sup>[14]</sup>通过单一复合 FB(Fischer-Burmeister)函数整合无功上下限互补约束, 使其互补潮流模型能够保持常规潮流整体计算结构。但其忽视 FB 函数的非光滑性, 仍沿用启发式判断校正结构。

本文在文献<sup>[14]</sup>基础上采用光滑逼近非线性互补函数完备描述无功电压互补规律, 构建节点约束统一的改进互补潮流模型; 不再采用启发式判断校正结构, 迭代过程中自动辨析无功越限状况并相应渐进式校正无功电压值; 保持常规潮流计算整体结构的同时, 具有较好的数值收敛性, 并通过节点统一的互补约束方程数值化表现潮流计算中识别性发散情形。此外, 压控节点无功电压调节特性不仅影响连续潮流<sup>[15-16]</sup>计算结果的准确性, 也与电压稳定分析中极限诱导分岔现象息息相关<sup>[17-19]</sup>。本文将该互补潮流方法应用于连续潮流中, 采用通用型临界点数值识别方法可有效获得静态电压稳定临界点信息。多个测试算例的计算验证了本文方法的有效性。

收稿日期: 2015-03-01; 修回日期: 2015-11-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51077042); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20120094110008); 清华大学“电力系统及发电设备控制与仿真”国家重点实验室开放课题(SKLD11KZ02)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (51077042), Special Foundation of the Doctoral Program of Higher Education (20120094110008) and Open Foundation of State Key Lab of Power System, Tsinghua University (SKLD11KZ02)

## 1 节点约束统一的互补潮流模型

### 1.1 光滑逼近互补函数

互补约束旨在描述变量之间普遍存在的不可微逻辑转换关系,电力系统中常将其用以处理发电机、变压器等设备的调节特性。令  $F: \mathbf{x} \rightarrow \mathbf{R}^n, \mathbf{x} \in \mathbf{R}^n$  是  $\mathbf{R}^n$  到  $\mathbf{R}^n$  的映射,非线性互补问题(NCP)可记为:

$$0 \leq \mathbf{x} \perp F(\mathbf{x}) \geq 0 \quad (1)$$

其中,“ $\perp$ ”表示  $\mathbf{x}$  和  $F(\mathbf{x})$  满足以下关系:①  $\mathbf{x} > 0, F(\mathbf{x}) = 0$ ;②  $\mathbf{x} = 0, F(\mathbf{x}) > 0$ ;③  $\mathbf{x} = 0, F(\mathbf{x}) = 0$ 。若数值解  $\mathbf{x}$  满足关系③称为临界互补,满足其余式则称为严格互补。

求解非线性互补约束的重要思路在于构造二元 NCP 函数将其转化为非线性方程的求解问题。常用 FB 函数表达式为:

$$\phi(a, b) = \sqrt{a^2 + b^2} - a - b \quad \forall (a, b)^T \in \mathbf{R}^2 \quad (2)$$

式(2)具有如下性质: $\phi(a, b)$ 在任何点均满足局部 Lipschitz 连续,除  $(a, b) = (0, 0)$  点外可微。此半光滑函数无法采用牛顿法直接求解,对此本文引入 FB 函数的一种光滑逼近形式<sup>[20]</sup>:

$$\begin{aligned} \phi_{\text{FB}}(a, b, \mu) &= \sqrt{a^2 + b^2 + \mu^2} - a - b \\ \phi_{\text{FB}}: \mathbf{R}^2 \rightarrow \mathbf{R}, \mu > 0 \quad \forall (a, b)^T \in \mathbf{R}^2 \end{aligned} \quad (3)$$

其中,  $\mu$  为松弛参数。函数  $\phi_{\text{FB}}$  任意阶连续可导。当满足  $\mu \rightarrow 0$  时,式(3)与式(2)等价。求解此逼近方程关键在于构造满足迭代规则的序列  $\{\mu_k\}$ 。

### 1.2 无功电压互补约束统一描述

电力系统中类似发电机等无功注入设备具有局部电压支撑能力,所接入节点常称为压控节点。其无功出力约束为:

$$Q_i^{\min} \leq Q_i^{\text{gen}} \leq Q_i^{\max} \quad (4)$$

其中,  $Q_i^{\max}$  和  $Q_i^{\min}$  分别为发电机  $i$  无功出力上、下限;  $Q_i^{\text{gen}}$  为发电机  $i$  无功出力值。若无功出力满足上式约束,则节点电压能维持设定值:

$$U_i = U_i^{\text{set}} \quad (5)$$

无功出力达到上限  $Q_i^{\max}$  后并维持此值,节点电压将因无功欠量而低于设定值,可表示为:

$$0 \leq (Q_i^{\max} - Q_i^{\text{gen}}) \perp (U_i^{\text{set}} - U_i) \geq 0 \quad (6)$$

同理当无功出力达到并维持下限  $Q_i^{\min}$  时,无功电压关系为:

$$0 \leq (Q_i^{\text{gen}} - Q_i^{\min}) \perp (U_i - U_i^{\text{set}}) \geq 0 \quad (7)$$

由于压控节点无功上下限的存在,对于单一节点需满足式(6)、(7)2个约束条件。相关文献将约束方程光滑化表示并加入潮流方程<sup>[12-13]</sup>,潮流模型需额外增加方程和变量各  $3N_{\text{PV}}$  个( $N_{\text{PV}}$  为系统 PV 节点数目),常规潮流计算结构难以维持,模型复杂度提高。

本文在文献[14]基础上将两者统一表示为:

$$\rho_i(U_i, Q_i^{\text{gen}}, \mu) = \phi_{\text{FB}}\{(Q_i^{\text{gen}} - Q_i^{\min}), \psi(U_i, Q_i^{\text{gen}}, \mu), \mu\} \quad (8)$$

$$\psi(U_i, Q_i^{\text{gen}}, \mu) = \phi_{\text{FB}}\{(Q_i^{\max} - Q_i^{\text{gen}}), -\alpha(U_i - U_i^{\text{set}}), \mu\} \quad (9)$$

其中,  $\alpha$  为松弛系数,本文算例中取  $\alpha = 10$ 。等式  $\rho_i(U_i, Q_i^{\text{gen}}, 0) = 0$  即可满足压控节点  $i$  无功上下限 2 个互补约束条件,在满足可微性的同时整合节点互补约束方程以适应潮流模型。

### 1.3 互补约束潮流模型

为确保互补潮流模型可微性,采用互补约束逼近方程统一描述节点无功电压无功约束,同时将松弛参数  $\mu$  加入潮流模型进行计算。迭代过程中,摒弃启发式判断校正的逻辑,改进潮流模型自动验证无功电压互补约束关系,并相应作数值调整。将上节互补约束逼近方程(8)引入潮流模型中,表示为:

$$\begin{cases} P_{is} - P_i(\mathbf{U}, \boldsymbol{\theta}) = 0 & i \in \Omega_G \cup \Omega_D \\ Q_{is} - Q_i(\mathbf{U}, \boldsymbol{\theta}) = 0 & i \in \Omega_D \\ \rho_i(U_i, Q_i^{\text{gen}}, \mu) = 0 & i \in \Omega_C \\ f_{\mu} = e^{\mu} - 1 = 0 \end{cases} \quad (10)$$

其中,  $\Omega_G, \Omega_D$  分别为由压控节点和非压控节点组成的集合;  $\mathbf{U}, \boldsymbol{\theta}$  分别为节点电压的幅值和相角向量;  $P_{is}, Q_{is}$  分别为节点  $i$  给定的有功功率及无功功率。

改进方法将松弛参数  $\mu$  视为同等变量加以迭代,其中线性修正方程记为:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q^{\Omega_D} \\ \Delta \rho^{\Omega_C} \\ \Delta f_{\mu} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N & N' & 0 \\ M & L & L' & 0 \\ -SM' & -SL'' & K - SL''' & w \\ 0 & 0 & 0 & e^{\mu} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{\theta} \\ \Delta \mathbf{U}^{\Omega_D} \\ \Delta \mathbf{U}^{\Omega_C} \\ \Delta \mu \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中,  $H, N, M, L$  为雅可比矩阵的子阵,  $N', M', L', L''$  和  $L'''$  求解类似  $N, M$  和  $L$ ;  $S$  和  $K$  为对角线矩阵,  $w$  为列向量,相关定义如式(12)~(14)所示。

$$S = \frac{\partial \rho}{\partial Q^{\text{gen}}} \quad (12)$$

$$K = \left( \frac{\partial \rho}{\partial U^{\Omega_C}} \right) U^{\Omega_C} \quad (13)$$

$$w = \frac{\partial \rho}{\partial \mu} \quad (14)$$

本文模型较好地解决了互补潮流可微性和模型复杂性的问题。相比常规潮流模型只需增加 NCP 逼近方程的松弛参量,通过较少的修正计算即可保持整体计算结构。其完备考虑无功电压互补约束,迭代过程中不再显式区分和转换 PV-PQ 节点类型,无功越限状况由 NCP 函数自动识别并渐进式调整数值偏差。尽管迭代过程中可能存在无功电压数值不合约束情形,但最终收敛结果仍然满足互补约束。

潮流计算中对应于系统静态电压失稳类型存在 2 种发散情形:数值性发散和识别性发散<sup>[7]</sup>。节点类型转换逻辑在识别性发散情形中表现为存在一个或多个压控节点的类型频繁转换,方程失配量维持在小数值范围振荡。本文模型通过互补方程失配量刻

画压控节点无功电压约束状况,在识别性发散情形中存在约束方程失配量小范围振荡现象。与节点类型转换逻辑相对应,其实质为潮流计算识别性发散的数值表现形式。

## 2 互补约束连续潮流

计算电力系统功率传输极限是电压稳定性分析的重要内容。连续潮流在潮流模型的基础上通过增加连续变量静态模拟电网运行状况,其校正环节需正确计及无功电压约束关系,否则可能得到错误的PV曲线和临界点信息。极限诱导分岔(LIB)是由于无功源无功容量不足导致无法维持电压,从而引起系统电压崩溃。而其所对应的无功电压约束转换点满足:

$$\begin{cases} Q_i^{\text{gen}} = Q_i^{\text{max}} \\ U_i = U_i^{\text{set}} \end{cases} \quad (15)$$

在上文改进互补潮流模型基础上构建互补约束连续潮流,其参数化方程简记为:

$$f(\mathbf{x}, \lambda) = 0 \quad (16)$$

其中,  $\mathbf{x} = [\boldsymbol{\theta}, \mathbf{U}, \boldsymbol{\mu}]^T$  为上节互补潮流模型变量;  $\lambda$  为可变参数。

由于数值误差的存在,在连续潮流计算中精确辨析极限诱导分岔临界点存在困难。文献[19]通过检索临界点处PV节点变化情况识别分岔类型和关键发电机。本文提出一种通用型临界点数值识别方法,能够满足快速有效识别极限诱导分岔的需要。

临界点处采用二分法搜索直至步长满足:

$$|\Delta\lambda| < \varepsilon_\lambda \quad (17)$$

$$\begin{cases} \left. \frac{\partial\lambda}{\partial s} \right|_{(\mathbf{x}^n, \lambda^n)} > 0 \\ \left. \frac{\partial\lambda}{\partial s} \right|_{(\mathbf{x}^{n+1}, \lambda^{n+1})} < 0 \end{cases} \quad (18)$$

其中,  $\varepsilon_\lambda$  为搜索阈值;  $(\mathbf{x}^n, \lambda^n)$ 、 $(\mathbf{x}^{n+1}, \lambda^{n+1})$  为连续 2 个状态解。式(18)表明  $(\mathbf{x}^n, \lambda^n)$  位于曲线上半分支,  $(\mathbf{x}^{n+1}, \lambda^{n+1})$  位于曲线下半分支,则临界点  $(\mathbf{x}^*, \lambda^*)$  位于两点之间。此时遍历所有发电机节点,若存在式(19)即可判定当前点为极限诱导分岔点,节点  $i$  为引起分岔的关键发电机节点,否则即为鞍结分岔(SNB)点。

$$|U_i^{\text{set}} - U_i(\mathbf{x}^{n+1}, \lambda^{n+1})| + |Q_i^{\text{max}} - Q_i^{\text{gen}}(\mathbf{x}^n, \lambda^n)| < \varepsilon_p \quad (19)$$

其中,  $U_i(\mathbf{x}^{n+1}, \lambda^{n+1})$  表示状态  $(\mathbf{x}^{n+1}, \lambda^{n+1})$  处节点  $i$  电压值;  $Q_i^{\text{gen}}(\mathbf{x}^n, \lambda^n)$  表示状态  $(\mathbf{x}^n, \lambda^n)$  处发电机  $i$  无功出力;  $\varepsilon_p$  为设定的识别精度值。

## 3 算例分析

为验证本文所提模型的有效性,基于 C/C++ 语言环境通过 IEEE 标准算例和某实际 998 节点省网

系统为例进行仿真计算。

### 3.1 潮流方法有效性分析

针对潮流计算中无功限值约束处理技术的不同,将本文方法与常规潮流方法、文献[13]中互补潮流方法的计算收敛信息作对比,其中常规潮流方法采用节点类型双向转换逻辑[7],文献[13]方法中发电机无功出力初值取给定值。潮流计算中电压和功率偏差均采用标么值,收敛精度统一为  $10^{-4}$ ,潮流初值采用平启动策略,本文方法中初值  $\mu_0$  取  $10^{-3}$ 。表 1 给出测试算例的潮流计算迭代次数和收敛状况。

表 1 测试算例潮流计算方法收敛性能  
Table 1 Convergence performance of power flow calculation methods for test cases

| 算例       | 迭代次数   |          |      |
|----------|--------|----------|------|
|          | 常规潮流方法 | 文献[13]方法 | 本文方法 |
| IEEE 14  | 3      | 4        | 3    |
| IEEE 118 | 6      | 6        | 6    |
| IEEE 300 | 发散     | 发散       | 8    |
| SYS998   | 发散     | 发散       | 10   |

由表 1 数据可知,常规潮流方法在处理大规模系统时收敛性并不理想,迭代过程初期较剧烈的数值振荡易导致节点类型转换逻辑错误识别压控节点类型;文献[13]方法随着系统规模增大收敛性也不太理想;本文互补潮流方法相比具有更好的收敛性,通过互补方程可以有效约束无功电压值的校正,具有更好的抗数值振荡能力。

为进一步对比分析三者潮流方法在处理无功电压约束上的差异,详细研究 IEEE 300 算例迭代过程中发电机无功越限状况。

常规潮流方法采用 PV-PQ 节点类型转换逻辑处理发电机无功越限,迭代过程中存在多个节点类型频繁转换现象,其中 1 个节点无功锁定下限,其余均为上限。但实际潮流结果显示该越下限节点无功最终定于上限,该节点类型识别失败。图 1 和图 2 给出对比方法中此节点无功、电压迭代信息,图 2 中电压幅值为标么值。

可见, PV-PQ 节点转换逻辑通过启发式判断强

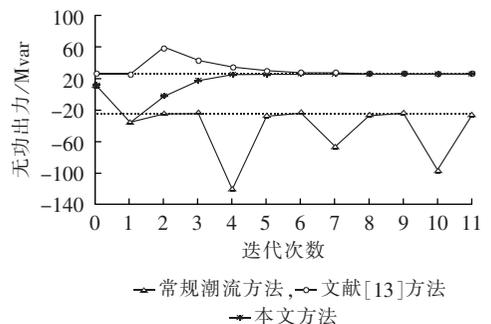


图 1 不同方法下发电机无功出力迭代过程比较  
Fig.1 Comparison of reactive power iteration process among different methods

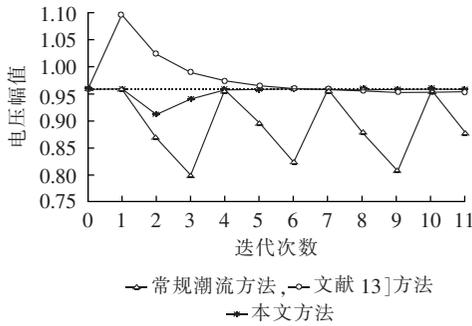


图 2 不同方法下发电机节点电压迭代过程比较  
Fig.2 Comparison of bus voltage iteration process among different methods

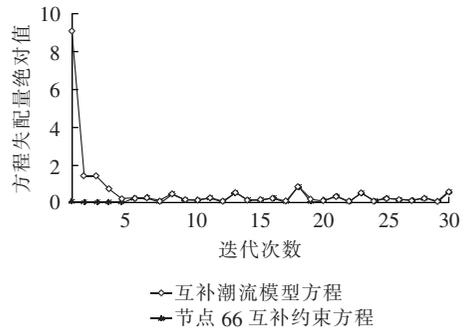


图 3 识别性发散情形下迭代过程  
Fig.3 Iteration process during divergence of identification

制锁定节点无功出力 and 电压幅值,处理方法粗糙且易过校正。在数值振荡剧烈时可能识别节点类型失败,陷入类型频繁转换而导致潮流不收敛。相对而言,互补潮流方法通过约束方程渐进式校正避免数值振荡的影响,能够在迭代过程中平滑准确地判定发电机无功出力状况。其中,文献[13]方法迭代过程中节点电压值振荡剧烈,难以收敛至准确值,本文方法则表现出更好的稳定性。

工程实践中为避免启发式逻辑导致的收敛问题,常在牛顿迭代多次后引入节点类型转换逻辑,该方法经验性较强而不稳定。针对表 1 中发散算例采用如下求解策略:首先不考虑发电机无功限值约束求得潮流解,然后以此解为初值引入 PV-PQ 节点类型转换逻辑重新计算潮流。表 2 列出对比模型潮流解的电压幅值最大偏差(标么值)。其中,本文模型与常规模型的电压幅值偏差在  $10^{-5}$  数量级内,准确性得以验证。

表 2 测试算例最大电压偏差  
Table 2 Maximum voltage deviation for test cases

| 算例       | 最大电压偏差    | 算例       | 最大电压偏差             |
|----------|-----------|----------|--------------------|
| IEEE 14  | 0         | IEEE 300 | $10^{-5}$          |
| IEEE 118 | $10^{-6}$ | SYS 998  | $3 \times 10^{-5}$ |

### 3.2 潮流节点类型识别性发散算例

对 IEEE 118 标准系统做数值修改,将节点 59 负荷增加为  $1055.66 + j502.33 \text{ MV} \cdot \text{A}$  构建条件算例。常规潮流方法的计算结果及分析参见文献[7],属于节点类型识别性发散情形。本文互补潮流方法在此条件下同样出现发散,模型方程失配量小范围数值振荡,多个压控节点无法满足其互补约束方程。图 3 给出本文潮流模型方程和 66 号发电机互补约束方程失配量之间的对比,图中方程失配量绝对值为标么值。可见关键发电机节点互补约束的满足情况制约了潮流的收敛,对应于启发式逻辑中节点类型频繁转换现象,本文潮流模型则通过相对应的互补约束方程数值化表现节点类型识别性发散现象。

### 3.3 互补约束连续潮流有效性分析

综合比较本文互补约束连续潮流与常规连续潮流的计算差别,其中常规连续潮流中采用文献[19]中静态稳定临界点的识别方法。连续潮流计算中采用局部参数化技术和定步长控制策略,全网负荷和发电等比例增长,潮流收敛精度取  $10^{-5}$ ,本文方法中相关设定精度值为  $\varepsilon_\lambda = \varepsilon_p = 10^{-5}$ ,对比结果如表 3 所示。从表中可见,IEEE 300 与 SYS 998 在 2 种方法下稳定裕度偏差分别为 0.3 MW、5.0 MW。

表 3 临界点信息对比结果  
Table 3 Comparison of critical point information

| 方法       | 算例       | 稳定裕度/MW | 临界点类型 | 关键发电机 |
|----------|----------|---------|-------|-------|
| 常规连续潮流   | IEEE 300 | 1289.24 | SNB   | —     |
|          | SYS 998  | 4587.14 | LIB   | 89    |
| 本文互补连续潮流 | IEEE 300 | 1288.94 | SNB   | —     |
|          | SYS 998  | 4582.14 | LIB   | 89    |

从表 3 可知,本文互补约束连续潮流能够准确识别临界点分岔类型和关键约束转换点。大规模系统中与常规连续潮流方法所得稳定裕度值偏差近似 0.1%,静态稳定临界点计算结果可信。

## 4 结论

本文提出一种节点互补约束统一的改进潮流计算模型。区别于常规启发式节点类型转换逻辑,迭代过程中自动渐进式校正无功电压值,避免由于采用错误的 PV-PQ 转换逻辑或引入该逻辑时机不当导致潮流计算失败或收敛于误解。其具有以下特点:

- a. 采用非线性互补光滑逼近函数统一描述压控节点无功电压特性,保证了互补潮流模型的可微性;
- b. 整合统一压控节点无功上下限互补约束方程,通过较少修正计算即可保持牛顿法潮流整体结构,便于现今工业界算法的进一步拓展;
- c. 对应于启发式逻辑节点类型频繁转换现象,能够提供潮流节点类型识别性发散的数值化表现形式。

在此基础上构建互补约束连续潮流,采用通用

型临界点数值识别方法可有效辨别静态稳定分岔类型和关键约束,静态稳定裕度准确可信。多个算例的综合分析表明本文潮流模型的准确性和有效性。

### 参考文献:

- [1] 王锡凡,方万良,杜正春. 现代电力系统分析[M]. 北京:科学出版社,2003:55-111.
- [2] 张伯明,陈寿孙,严正. 高等电力网络分析[M]. 北京:清华大学出版社,2007:172-188.
- [3] 张树卿,童陆园,洪潮,等. 基于线性功率-电压方程的快速潮流计算方法[J]. 电力自动化设备,2013,33(6):37-41.  
ZHANG Shuqing,TONG Luyuan,HONG Chao,et al. Fast power flow calculation based on linear power-voltage equation[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(6):37-41.
- [4] 杨雄,卫志农,孙国强,等. 含分布式电源的配电网三相解耦潮流计算方法[J]. 电力自动化设备,2014,34(3):99-107.  
YANG Xiong,WEI Zhinong,SUN Guoqiang,et al. Decoupled three-phase power flow calculation for distribution network with DGs[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(3):99-107.
- [5] 傅裕,杨建华,张琪. 含直流电源与负荷的交直流系统潮流算法[J]. 电力自动化设备,2013,33(1):96-99.  
FU Yu,YANG Jianhua,ZHANG Qi. Power flow algorithm for AC/DC system with DC sources and loads[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(1):96-99.
- [6] 王晶,骆旭伟,陈骏宇,等. 含微电网中压系统的PQ-同伦全局潮流计算方法[J]. 电力自动化设备,2015,35(10):15-20.  
WANG Jing,LUO Xuwei,CHEN Junyu,et al. PQ-homotopy method for calculating global power flow of MV system with microgrids[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(10):15-20.
- [7] 赵晋泉,江晓东,张伯明. 潮流计算中PV-PQ节点转换逻辑的研究[J]. 中国电机工程学报,2005,25(1):54-59.  
ZHAO Jinqun,CHIANG H D,ZHANG Boming. Study on PV-PQ bus type switching logic in power flow computation[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(1):54-59.
- [8] 韩继业,修乃华,戚厚铎. 非线性互补理论与算法[M]. 上海:上海科学技术出版社,2006:1-125.
- [9] 孟伟. 非线性互补问题的一种光滑化解法[D]. 青岛:青岛大学,2014.  
MENG Wei. A smoothing method for nonlinear complementarity problems[D]. Qingdao:Qingdao University,2014.
- [10] 李保卫,韦化,李滨,等. 潮流PV-PQ转换的混合互补方法[J]. 电力系统自动化,2009,33(14):37-40.  
LI Baowei,WEI Hua,LI Bin,et al. Mixed complementarity method for PV-PQ bus type switching in power flow computation[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(14):37-40.
- [11] PIRNIA M,CANIZARES C A,BHATTACHARYA K. Revisiting the power flow problem based on a mixed complementarity formulation approach[J]. IET Generation,Transmission & Distribution,2013,7(11):1194-1201.
- [12] KATAOKA Y. A smooth power flow model of electric power system with generator reactive power limits taken into consideration[C]//Proceedings of the IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Kobe,Japan:IEEE,2005:5286-5289.
- [13] 蔡广林,张勇军,蔡泽祥,等. 光滑化非线性互补约束的节点类型转换模型[J]. 中国电机工程学报,2008,28(31):29-34.  
CAI Guanglin,ZHANG Yongjun,CAI Zexiang,et al. Bus type switch model based on smooth nonlinear complementarity constraints[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(31):29-34.
- [14] SUNDARESH L,RAO P N. A modified Newton-Raphson load flow scheme for directly including generator reactive power limits using complementarity framework[J]. Electric Power Systems Research,2014,109(1):45-53.
- [15] CHIANG H D,FLUECK A J,SHAH K S,et al. CPFLOW:a practical tool for tracing power system steady-state stationary behavior due to load and generation variations[J]. IEEE Transactions on Power Systems,1995,10(2):623-634.
- [16] 赵晋泉,张伯明. 连续潮流及其在电力系统静态稳定分析中的应用[J]. 电力系统自动化,2005,29(11):91-97.  
ZHAO Jinqun,ZHANG Boming. Summarization of continuation power flow and its applications in static stability analysis of power system[J]. Automation of Electric Power Systems,2005,29(11):91-97.
- [17] 李华强,刘亚梅,YORINO N. 鞍结分岔与极限诱导分岔的电压稳定性评估[J]. 中国电机工程学报,2005,25(24):56-60.  
LI Huaqiang,LIU Yamei,YORINO N. Voltage stability assessment for saddle node bifurcation and limit induced bifurcation[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(24):56-60.
- [18] 李少华. 结构诱导分岔和改进的连续潮流在电压稳定分析中的发展及应用[D]. 上海:上海交通大学,2008.  
LI Shaohua. Development of structure-induced bifurcation and advanced continuation power flow and its applications on voltage stability analysis[D]. Shanghai:Shanghai Jiao Tong University,2008.
- [19] 赵晋泉,江晓东,张伯明. 一种静态电压稳定临界点的识别和计算方法[J]. 电力系统自动化,2004,28(23):28-32.  
ZHAO Jinqun,CHIANG H D,ZHANG Boming. Approach for identification and computation of static voltage stability critical point[J]. Automation of Electric Power Systems,2004,28(23):28-32.
- [20] KANZOW C. Some noninterior continuation methods for linear complementarity problems[J]. SIAM Journal on Matrix Analysis and Applications,1996,17(4):851-868.

### 作者简介:



郑浩

郑浩(1989—),男,江苏淮安人,硕士研究生,主要从事电力系统稳定与控制方面的研究工作;

赵晋泉(1972—),男,山西阳泉人,教授,博士,主要从事电力系统优化运行、电压稳定分析与控制和电力市场等方面的研究工作(E-mail:jqzhaoy@tom.com);

杨乘胜(1977—),男,江苏南京人,工程师,硕士研究生,从事电力系统自动化方面的研究及管理工作;

陈刚(1972—),男,江苏南京人,博士研究生,主要从事电力系统稳定与控制方面的研究工作。

(下转第135页 continued on page 135)

Automation of Electric Power Systems,2006,30(23):27-32.

[21] DING L J,FAN H. BOCS based power system stability margin estimation [J]. Advanced Materials Research,2013,2694 (805): 693-699.

[22] 谭伟,沈沉,刘锋,等. 基于轨迹特征根的暂态稳定实用判据[J]. 电力系统自动化,2012,36(16):14-19.

TAN Wei,SHEN Chen,LIU Feng,et al. A practical criterion for trajectory eigenvalues based transient stability analysis [J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(16):14-19.

#### 作者简介:



王羽佳

王羽佳(1991—),女,四川南充人,硕士研究生,研究方向为电力系统分析、稳定及优化(E-mail:wyjiar@163.com);

李华强(1965—),男,四川成都人,教授,博士,长期从事电力系统分析、稳定及优化问题研究。

## Optimal reclosing time orienting to transient stability and its online setting

WANG Yujia,LI Huaqiang,HUANG Yan,FAN Hang

(School of Electrical Engineering and Information,Sichuan University, Chengdu 610065,China)

**Abstract:** The absolute kinetic energy criterion of ORCT(Optimal Reclosing Time) is proposed based on the two-machine equivalence method and an index is built to reflect the stability of post-reclosing system. The curve feature fitting method is adopted to online predict the equivalent angular velocity of post-fault generator according to the real-time data measured by the wide area measurement system,and a method of online ORCT setting is given. Case simulation shows that,the proposed method online predicts the ORCT and suppresses the system oscillation,which enhances the system transient stability. The stability index verifies the reasonability of the proposed method.

**Key words:** electric power systems; stability; transients; oscillation; optimal reclosing time; two-machine equivalence; online prediction

(上接第 128 页 continued from page 128)

## Complementary power flow model with unified bus constraints and its application

ZHENG Hao<sup>1,2</sup>,ZHAO Jinquan<sup>1,2</sup>,YANG Chengsheng<sup>2,3</sup>,CHEN Gang<sup>1,2</sup>

(1. Research Center for Renewable Energy Generation Engineering,Ministry of Education,Hohai University,Nanjing 210098,China;2. College of Energy and Electrical Engineering,Hohai University,Nanjing 210098,China;

3. Guodian Nanjing Automation Co.,Ltd.,Nanjing 211100,China)

**Abstract:** A complementary power flow model with unified bus constraints is proposed. Different from the conventional structure of heuristic judgment and correction,the reactive-power limit-violation of voltage-controlled node is automatically identified and progressively corrected during the Newton iteration to avoid the failure or incorrect convergence of power flow calculation caused by the wrong PV-PQ switching logic. The characteristics of reactive-power and voltage constraints are described by the normalized nonlinear complementary approximation function to maintain the overall structure of power flow Jacobian matrix for better dealing with the differentiability and complexity of complementary power flow model. A numerical form for representing the divergence of power-flow node-type identification is provided. The continuous power flow with complementary constraints is constructed and a general numerical method of critical point identification is applied to effectively detect its bifurcation type and key constraints. The effectiveness of the proposed model and method is verified by multiple test cases.

**Key words:** bus-type switching; complementary constraint; power flow model; continuous power flow; voltage stability; models; electric power systems; stability