

一种计算结果与平衡节点位置选择无关的动态潮流模型

申家锴¹, 穆永强², 王春生³, 王勇², 王鹤霏⁴, 张蓉蓉¹, 李卫东^{*1}

(1. 大连理工大学 电气工程学院, 辽宁 大连 116024;
2. 国网辽宁省电力有限公司, 辽宁 沈阳 110006;
3. 国网辽宁省电力有限公司 经济技术研究院, 辽宁 沈阳 110015;
4. 东北电力大学, 吉林 吉林 132012)

摘要: 特高压交直流混联电网运行中, 需要实时掌握系统潮流变动态势, 提早决策, 以保证电力系统的安全稳定运行. 而现有潮流算法存在诸如计算结果与平衡节点位置选择相关, 或没有考虑频率动态过程的问题. 针对上述问题, 提出了一种不受平衡节点位置选择影响的动态潮流模型. 通过将系统频率变量引入常规潮流方程中, 使得惯性、发电机组和负荷的功频静特性、系统运行有功功率损耗等与系统运行频率相关的变量可以在一组联立方程内进行协调求解, 从而保证所有发电机组包括平衡节点的功率增量全部与频率偏差呈比例关系, 可解决常规潮流中计算结果与平衡节点位置选择相关问题. IEEE-39 节点测试系统的仿真算例表明, 所提算法计算结果不依赖平衡节点位置选择, 且计算速度快, 可满足在线运行要求.

关键词: 动态潮流; 平衡节点; 特高压交直流混联电网; 大功率缺失

中图分类号: TM744

文献标识码: A

doi: 10.7511/dllgxb201902010

0 引言

在我国经济快速发展的同时, 日益严峻的环境问题越来越受到人们的重视. 促进风能、太阳能等清洁能源的发展和應用也成为了我国电网建设的一项重要任务. 然而我国地域辽阔, 大量清洁能源往往远离负荷中心, 想要开发使用清洁能源则离不开电能的远距离输送. 但电能传输过程中会产生一定的损耗, 且随着传输距离的增加损耗也会增加, 进而增加了输电成本. 为实现远距离低成本输送大量电能, 特高压直流输电技术得到了快速发展^[1].

我国目前已初步形成了以特高压交流为骨干网架的交直流混合联网运行格局, 在降低了输电成本的同时, 也带来了一些新的问题^[2-3]. 尤其在特高压直流输电过程中, 单极闭锁故障频发, 事故造成的大量功率缺额往往会给线路两端网络造成较大冲击. 在事故发生瞬间到系统一次调频结束

的时间内, 机组出力与负荷都会快速变化, 导致潮流转移, 这一方面极有可能造成局部潮流过重并导致线路跳闸、系统低频减载^[4-5], 另一方面剧烈的潮流波动会引起直流输电线路换相失败从而导致闭锁故障, 引发连锁事故^[6-7]. 因此, 需要掌握系统整体潮流变动态势, 提早决策, 以保证电力系统的安全稳定运行. 这需要进行动态潮流分析.

对于动态潮流分析, 目前均采用转子运动方程(微分方程)和潮流方程(代数方程)联立求解的方式进行解算^[8-13], 但无论是交替还是联立求解, 由于其代数方程采用常规潮流方程, 存在计算结果与平衡节点位置选择相关的问题, 特别是在大扰动下问题更为明显.

文献[14]在进行静态电压稳定性分析中提出的一种动态潮流方程可解决平衡节点位置选择问题, 但该方法属于稳态潮流计算范畴, 不能考虑潮流的动态变化过程.

收稿日期: 2018-07-19; 修回日期: 2019-01-25.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51677018).

作者简介: 申家锴(1991-), 男, 博士生, E-mail: shenjiakai@mail.dlut.edu.cn; 李卫东*(1963-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, E-mail: wdli@dlut.edu.cn.

针对上述问题,本文提出一种不受平衡节点位置选择影响的动态潮流模型.通过将系统频率变量引入常规潮流方程,使得系统惯性、机组功频静特性、负荷的静频特性、系统运行有功功率损耗等与系统运行频率相关的变量可以在一组联立方程内进行协调求解,从而保证所有发电机组包括平衡节点的功率增量全部与频率偏差呈比例关系,从而解决常规潮流计算结果与平衡节点位置选择相关问题.通过 IEEE-39 节点测试系统的仿真验证本文提出的算法.

1 数学模型

1.1 物理过程

电力系统运行过程中,会遇到多种大功率缺失情况,包括电源侧突发大功率缺失、负荷侧突发大功率缺失.大功率缺失类型又可分为阶跃型与连续型等.

以电源侧突发大功率缺失事故为例,事故发生瞬间,发电机组一、二次调节由于延时作用不会动作,同时负荷也不会瞬间降低,依据能量守恒定律,电源侧缺失的功率将由系统中发电机组等旋转设备的旋转动能提供,这也就是系统的惯性作用.此时,作用在转子上的机械转矩小于电磁转矩,出现加速的净转矩,导致转子转速下降,系统频率降低.同样,具有旋转元件的负荷会随系统频率降低而有所下降.

当达到一次调节延时后,发电机组一次调节启动.当缺失功率较大时,机组很难瞬间平衡系统不平衡功率.此时机组会根据功频静特性曲线逐步提高出力,作用在转子上的机械转矩变大,导致净转矩减小,转子转速下降速率逐渐降低;当机械转矩等于电磁转矩时,净转矩为零,转子转速停止下降.但由于延时作用,发电机组一次调节可能存在一定的过调现象,导致系统频率出现波动并最终趋于稳定.

1.2 动态潮流模型

为得到系统的实时潮流,需要准确的系统功率时域表达式.

设 1 个 n 节点系统,含有 1 个平衡节点, Ω_n 、 Ω_r 、 Ω_l 分别为其系统节点、发电机节点(PV)、负荷节点(PQ)的集合.

设此系统 t 时刻前处于有功平衡的稳定运行状态,系统频率为标准频率; t 时刻电源侧突发大功率缺失事故,系统不平衡功率可表示为

$$P_{acc}^t = \sum_{i=1}^n P_{gi}^t + \sum_{i=1}^n P_{gri}^t - \sum_{i=1}^n P_{li}^t - P_{loss}^t \quad (1)$$

式中: P_{acc}^t 为 t 时刻系统的不平衡功率, P_{gi}^t 、 P_{li}^t 分别为 t 时刻节点 i 的机组有功出力与有功负荷, P_{loss}^t 为 t 时刻系统网损总量, P_{gri}^t 为 t 时刻节点 i 发电侧有功缺失量.

从 t 时刻到 $t+1$ 时刻,系统各状态量的变化关系如下:

$$\begin{aligned} P_{gi}^{t+1} &= P_{gi}^t + P_{gri}^t + \Delta P_{gi}^{t+1} + P_{gri}^{t+1} \\ P_{li}^{t+1} &= P_{li}^t + \Delta P_{li}^{t+1} \\ P_{loss}^{t+1} &= P_{loss}^t + \Delta P_{loss}^{t+1} \quad ; i \in \Omega_n \quad (2) \\ P_{acc}^{t+1} &\approx -T_{js} \frac{\Delta \omega^{t+1}}{\Delta t} \end{aligned}$$

式中: ΔP_{gi}^{t+1} 为节点 i 机组一次调节在 t 到 $t+1$ 时刻内有功出力变化量, ΔP_{li}^{t+1} 为节点 i 负荷在静频特性作用下 t 到 $t+1$ 时刻内的变化量, ΔP_{loss}^{t+1} 为系统总网损在 t 到 $t+1$ 时刻内的变化量, T_{js} 为系统每节点发电机组的惯性时间常数 T_{ji} 之和, $\Delta \omega^{t+1}$ 为 t 到 $t+1$ 时刻系统角频率的变化量.

$$\begin{aligned} \Delta P_{gi}^{t+1} &= K_{gi} \frac{\Delta \omega^{t+1} - T_1}{2\pi} \\ \Delta P_{li}^{t+1} &= K_{li} \frac{\Delta \omega^{t+1}}{2\pi} \quad ; i \in \Omega_n \quad (3) \end{aligned}$$

式中: K_{gi} 为节点 i 发电机组的单位调节功率,当节点 i 机组一次调节能力为零时, $K_{gi} = 0$; K_{li} 为节点 i 负荷的单位调节功率; T_1 为发电机组一次调节延迟时间.

利用上述表达式, $t+1$ 时刻的系统潮流可用 t 时刻状态量表示,则系统的有功潮流方程可改写为

$$\begin{aligned} P_i^t + T_{ji} \frac{\Delta \omega^{t+1}}{\Delta t} - \Delta P_{li}^{t+1} - P_i^{t+1}(\mathbf{V}, \boldsymbol{\theta}) &= 0 \\ P_i^t &= P_{gi}^t + \Delta P_{gi}^{t+1} + P_{gri}^t + P_{gri}^{t+1} - P_{li}^t \\ P_i^{t+1}(\mathbf{V}, \boldsymbol{\theta}) &= V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \Big|_{t+1} \quad ; \\ & i \in \Omega_r \cup \Omega_l \quad (4) \end{aligned}$$

式中: P_i^t 为节点 i 在 t 到 $t+1$ 时刻机组调节后的有功功率; $P_i^{t+1}(\mathbf{V}, \boldsymbol{\theta})$ 为节点 i 在 $t+1$ 时刻有功功率表达式, \mathbf{V} 和 $\boldsymbol{\theta}$ 为系统的状态向量,即系统节点电压 V 和相角 θ 组成的向量; G_{ij} 、 B_{ij} 分别为节

点 i, j 之间的电导和电纳。

不考虑系统无功变化,即:

$$Q_i' - Q_i^{t+1}(\mathbf{V}, \boldsymbol{\theta}) = Q_i - Q_i^{t+1}(\mathbf{V}, \boldsymbol{\theta}) = 0$$

$$Q_i^{t+1}(\mathbf{V}, \boldsymbol{\theta}) = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \Big|_{t+1};$$

$$i \in \Omega_1 \quad (5)$$

式中: Q_i' 为节点 i 在 t 到 $t+1$ 时刻调整后的无功功率; $Q_i^{t+1}(\mathbf{V}, \boldsymbol{\theta})$ 为节点 i 在 $t+1$ 时刻无功功率表达式。

系统网损平衡方程可表示为

$$P_{\text{loss}}' + T_{\text{js}} \frac{\Delta \omega^{t+1}}{\Delta t} - \sum_{i=1}^n \Delta P_{\text{gi}}^{t+1} - P_{\text{loss}}^{t+1}(\mathbf{V}, \boldsymbol{\theta}) = 0$$

$$P_{\text{loss}}' = P_{\text{loss}}^t + \sum_{i=1}^n \Delta P_{\text{gi}}^{t+1} + \sum_{i=1}^n P_{\text{gri}}^{t+1} + P_{\text{acc}}^t \quad (6)$$

$$P_{\text{loss}}^{t+1}(\mathbf{V}, \boldsymbol{\theta}) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n V_i V_j G_{ij} \cos \theta_{ij} \Big|_{t+1}$$

式中: Δt 为仿真步长; P_{loss}' 为系统在 t 到 $t+1$ 时刻机组调节后的系统有功网损; $P_{\text{loss}}^{t+1}(\mathbf{V}, \boldsymbol{\theta})$ 为 $t+1$ 时刻系统有功网损表达式。

联立式(4)、(5)、(6)得到系统实时潮流扩展方程组:

$$P(\mathbf{V}, \boldsymbol{\theta}, \omega) \Big|_{t+1} = 0$$

$$Q(\mathbf{V}, \boldsymbol{\theta}) \Big|_{t+1} = 0 \quad (7)$$

$$P_{\text{loss}}(\mathbf{V}, \boldsymbol{\theta}, \omega) \Big|_{t+1} = 0$$

此时,新的雅可比矩阵为

$$J' = \begin{pmatrix} \mathbf{H} & \mathbf{N} & \mathbf{M} \\ \mathbf{J} & \mathbf{L} & \mathbf{0} \\ \mathbf{C} & \mathbf{D} & \mathbf{F} \end{pmatrix} \quad (8)$$

式中:子阵 $(\mathbf{H} \ \mathbf{N}; \mathbf{J} \ \mathbf{L})$ 为原常规潮流雅可比矩阵; \mathbf{M} 为由节点注入功率引入的一列,即节点注入功率向量; $\mathbf{C}, \mathbf{D}, \mathbf{F}$ 为网损方程引入的行向量。

引入向量 $\mathbf{C}, \mathbf{D}, \mathbf{M}, \mathbf{F}$ 中元素的表达式为

$$C_i = \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial \theta_i} = 2V_i \sum_{j \in i} V_j G_{ij} \sin \theta_{ij} \Big|_{t+1}; \quad i \in \Omega_r \cup \Omega_1 \quad (9)$$

$$D_i = \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial V_i} V_i = -2V_i \sum_{j \in i} V_j G_{ij} \cos \theta_{ij} \Big|_{t+1}; \quad i \in \Omega_1 \quad (10)$$

$$M_i = \frac{\partial P_i}{\partial \omega} = \frac{T_{ji}}{\Delta t} - \frac{K_{li}}{2\pi}; \quad i \in \Omega_r \cup \Omega_1 \quad (11)$$

$$F = \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial \omega} = \frac{T_{\text{js}}}{\Delta t} - \frac{K_{\text{ls}}}{2\pi} \quad (12)$$

式中: K_{ls} 为系统负荷的单位调节功率之和。

求解式(7)可得到 $t+1$ 时刻系统状态参数,利用得到的参数修正节点有功出力、有功负荷以及不平衡功率,将其作为已知量,进行下一时刻的潮流仿真。

1.3 模型计算量分析

设 n 节点系统中,含有 1 个平衡节点, r 个发电机节点, $(n-r-1)$ 个负荷节点. 则扩展潮流方程组中,含有 $(n-1)$ 个有功平衡方程, $(n-r-1)$ 个无功平衡方程, 1 个系统总网损方程, 共有方程 $(2n-r-1)$ 个. 与常规潮流计算方程相比, 方程数增加 1 个, 雅可比矩阵增加 1 行 1 列, 其中 \mathbf{M}, \mathbf{F} 均为常数向量, \mathbf{C}, \mathbf{D} 元素个数为 $(2n-r-2)$, 因此, 计算量增加的比例不超过 $1/(2n-r-2)$.

可以看出, 随着节点数 n 的增大, 计算量增加的比例减小, 逐渐趋于零. 因此, 与常规潮流计算相比, 随着节点数的增加, 模型计算量增加不大, 速度可满足在线仿真要求。

2 模型比较

2.1 按比例系数分配模型

文献[14]中使用的动态潮流模型对系统的不平衡功率进行了细化, 考虑了网损增量对不平衡功率的影响. 由于文献[14]解决目标在于求解连续潮流, 为和该文献做比较, 本文将动态潮流模型单独提取出来, 与本文模型进行对比。

为方便对比, 该模型同样使用发电侧功率变化情况, 则原模型中对应不平衡功率的变化可表示为

$$P_{\text{acc}} = \sum_{i=1}^n P_{\text{gri}} + \Delta P_{\text{loss}} \quad (13)$$

该不平衡功率将由系统中所有发电机组共同分担, 则发电机节点的有功平衡方程可改写为

$$P_{\text{gi}} + \beta_i P_{\text{acc}} - P_{li} - P_i(\mathbf{V}, \boldsymbol{\theta}) = 0; \quad i \in \Omega_n \quad (14)$$

式中: $\beta_i = K_{\text{gi}}/K_{\text{gs}}$, 为节点 i 上发电机组分担的不平衡功率对应比例, 当节点 i 上发电机组调节能力为零时, $\beta_i = 0$, 且 $\sum_{i=1}^n \beta_i = 1$; K_{gs} 为系统所有发电机组的单位调节功率之和。

同时, 该模型引入了网损变量修正量 ΔP_{loss} , 则有如下关系:

$$P_{\text{loss}} = P_{\text{loss}}(\mathbf{V}, \boldsymbol{\theta}) - \Delta P_{\text{loss}} \quad (15)$$

需要注意的是, P_{loss} 为变化前网损总量, 且是

已知量, ΔP_{loss} 为变化量, $P_{\text{loss}}(\mathbf{V}, \boldsymbol{\theta})$ 为当前网损表达式. 则该模型中的动态潮流可用如下方程组表示:

$$\begin{aligned} P(\mathbf{V}, \boldsymbol{\theta}, \Delta P_{\text{loss}}) &= 0 \\ Q(\mathbf{V}, \boldsymbol{\theta}) &= 0 \\ P_{\text{loss}}(\mathbf{V}, \boldsymbol{\theta}, \Delta P_{\text{loss}}) &= 0 \end{aligned} \quad (16)$$

由式(13)、(14)可以看出, 该模型中每一步动态潮流计算都将系统中的不平衡功率一步到位地分配给相应机组. 得到潮流计算结果的同时完成了不平衡功率的分配, 也就是该潮流结果中不存在不平衡功率, 这是一种准动态的潮流结果. 由于该模型没有考虑系统中的频率变化, 进而忽略了频率变化引起的负荷波动, 导致潮流计算具有一定的误差.

2.2 按机组及负荷特性分配模型

文献[12]利用动态潮流算法实现了有功无功潮流联合调整, 为方便与本文做比较, 不考虑无功潮流及电压变化, 同样只提取其有功动态潮流模型进行对比.

该模型中待分配的不平衡功率方程为

$$P_{\text{acc}} = \sum_{i=1}^n P_{g_i} - \sum_{i=1}^n P_{l_i} - P_{\text{loss}} - K_{gs} \Delta f \quad (17)$$

在对不平衡功率的定义方面, 忽略了负荷受频率变化影响引起的波动, 通常情况下系统中负荷静频特性系数较小, 造成的误差可忽略. 为方便对比, 在算例分析中, 增加系统负荷静频特性的影响, 将使用 $K_{gs} + K_{ls}$ 代替 K_{gs} , 使计算更准确.

忽略电压变化, 该模型的有功平衡方程可表示为

$$P_{g_i} + \alpha_i P_{\text{acc}} - (P_{l_i} + K_{li} \Delta f) - P_i(\mathbf{V}, \boldsymbol{\theta}) = 0; i \in \Omega_n \quad (18)$$

式中: $\alpha_i = K_{g_i} / K_{gs}$, 且同 β_i 类似, 当节点 i 上发电机组调节能力为零时, $\alpha_i = 0$.

该模型同样考虑了系统在分配不平衡功率后的网损变化, 引入了网损变化量 ΔP_{loss} . 该模型中的动态潮流方程组如下:

$$\begin{aligned} P(\mathbf{V}, \boldsymbol{\theta}, \Delta P_{\text{loss}}, f) &= 0 \\ Q(\mathbf{V}, \boldsymbol{\theta}) &= 0 \\ P_{\text{acc}}(\mathbf{V}, \boldsymbol{\theta}, \Delta P_{\text{loss}}, f) &= 0 \end{aligned} \quad (19)$$

由式(17)可以看出, 在有功平衡层面, 该模型考虑了负荷静频特性的作用, 但在机组功率分配

方面仍采用比例系数方式, 也就是说机组是按照一次调节能力分配系统不平衡功率. 与文献[14]类似, 通过该方法将系统不平衡功率一次性分配, 最后计算得到的潮流也是一种准动态潮流结果.

3 算例分析

3.1 模型对比分析

本文采用 IEEE-39 节点测试系统对所提出的动态潮流模型进行仿真验证, 并对几种动态潮流模型进行了对比分析. 如图 1 所示, 设该系统稳定运行时系统网损为 42.34 MW, 31 节点发电侧突然失去 120 MW 发电功率, 进行系统实时潮流仿真.

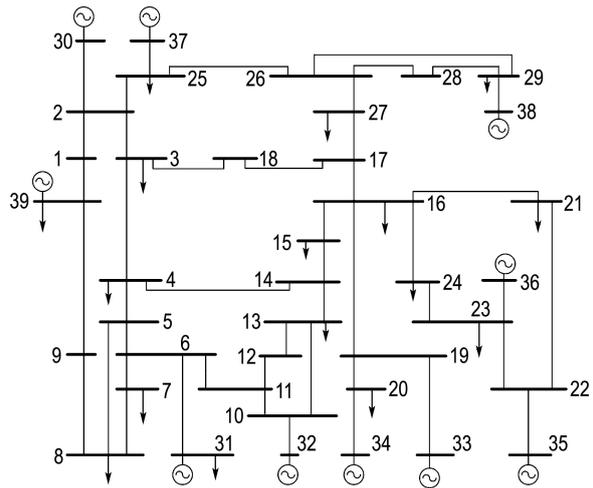


图 1 IEEE-39 节点测试系统

Fig. 1 IEEE-39 node test system

文献[14]中采用的动态潮流模型忽略了系统负荷静频特性的影响, 在频率变化较小且负荷静频特性系数较小的情况下引入的误差可以忽略不计, 但仍会导致一定的误差. 为使结果明显, 在这一部分仿真时, 适当提高了系统中负荷静频特性系数. 另外, 为了说明系统网损变化对动态潮流的影响, 此处还设置了忽略网损变化的对比模型, 如图 2 所示.

图 2 中, 模型 1 为本文所提不考虑网损变化的模型; 模型 2 为本文实时动态潮流模型; 模型 3 为文献[14]中使用的动态潮流模型. 动态潮流的核心就是消除平衡节点的影响, 那么在仿真过程中无论选择哪个节点做平衡节点, 都不会影响系统的仿真结果. 模型 1 计算结果不考虑系统中网

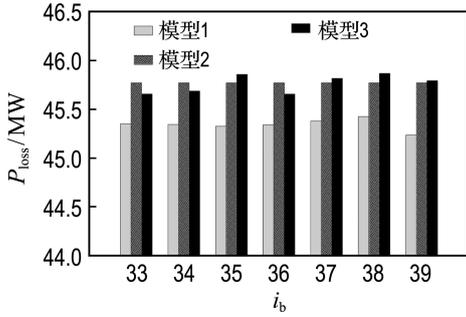


图2 选择不同平衡节点计算的系统网损

Fig. 2 System network loss calculated with different balancing nodes

损变化,那么变化的网损将全部由平衡节点承担,这与实际机组出力不符,导致计算结果不同.而文献[14]所提的模型虽然完成了不平衡功率的分配,但其未考虑频率的变化.受不平衡功率影响,在系统惯性的作用下,系统频率下降,系统负荷受静频特性影响也会随之下降,这会减小系统的不平衡功率.因此模型3分配的系统不平衡功率较实际偏大,网损变化量也更大一些.由模型2可以看出,本文提出的实时动态潮流模型计算结果完全不依赖平衡节点的选择,消除了平衡节点的影响.

为验证本文动态潮流模型的实时性,将本文模型与典型的动态潮流模型^[14]——准动态潮流模型——进行对比,以系统频率为仿真结果标准进行验证分析.

由图3可以看出,本文提出的实时动态潮流模型很好地模拟了系统在发生大功率缺失情况下系统频率的动态波动情况:在事故发生后,系统频率在稳态值附近波动并最终趋于稳态值,且最后频率波动的稳态值也与文献[14]提供的准动态潮

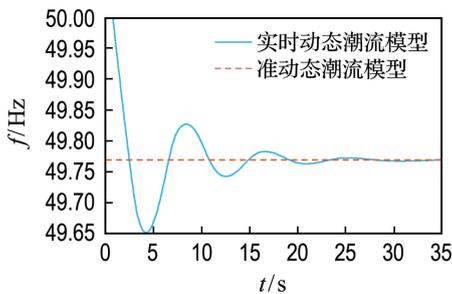


图3 频率仿真对比结果

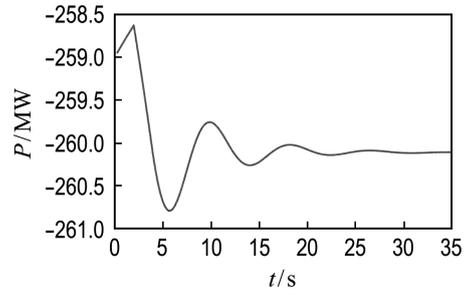
Fig. 3 Comparison results of the frequency simulation

流模型稳态值一致,说明本文提出的模型计算结果准确.

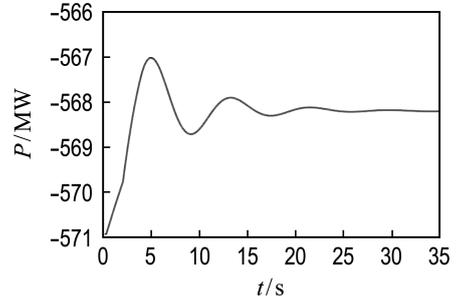
3.2 线路越限仿真

求解系统实时动态潮流的一个目的就是为了解决系统线路实时波动情况,防止系统线路发生越限,保证系统安全稳定运行.

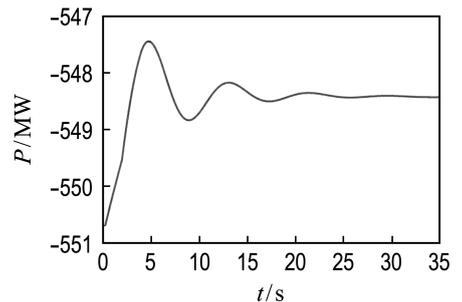
在31节点突然失去120 MW发电功率后,系统所有发电机组提高自身出力,用以满足系统有功平衡,其中典型系统线路功率波动情况如图4所示.



(a) 线路5(2-30)功率波动情况



(b) 线路39(23-36)功率波动情况



(c) 线路41(25-37)功率波动情况

图4 典型线路功率波动情况

Fig. 4 Power fluctuation of the typical lines

在事故发生后,为满足系统有功平衡,机组将逐步提高自身出力,其中承担了较多不平衡功率的机组对应的功率波动较大.且在系统动态运行过程中,线路传输功率峰值明显高于稳态值.由于

准动态潮流仿真不能得到系统运行过程中实际的峰值,有必要进行实时动态潮流仿真.

4 结 语

针对现有动态潮流算法的不足,本文建立了计算结果不受平衡节点位置选择影响的实时动态潮流模型.算例结果表明:在计算精度方面,所提模型依据系统惯性、发电机组与负荷功频静特性,可合理地分配系统实时不平衡功率,从而消除了计算结果对平衡节点位置选择的依赖,能对系统的潮流动态变化进行更精准的仿真;在计算速度方面,所提出的动态潮流模型与常规潮流模型相比较,其雅可比矩阵只增加了1行1列,计算速度可满足在线仿真的需求.

参 考 文 献:

- [1] 袁清云. 特高压直流输电技术现状及在我国的应用前景 [J]. 电网技术, 2005, **29**(14):1-3.
YUAN Qingyun. Present state and application prospect of ultra HVDC transmission in China [J]. **Power System Technology**, 2005, **29**(14):1-3. (in Chinese)
- [2] 齐旭,曾德文,史大军,等. 特高压直流输电对系统安全稳定影响研究 [J]. 电网技术, 2006, **30**(2):1-6.
QI Xu, ZENG Dewen, SHI Dajun, *et al.* Study on impacts of UHVDC transmission on power system stability [J]. **Power System Technology**, 2006, **30**(2):1-6. (in Chinese)
- [3] 汤涌,孙华东,易俊,等. 两大区互联系统交流联络线功率波动机制与峰值计算 [J]. 中国电机工程学报, 2010, **30**(19):1-6.
TANG Yong, SUN Huadong, YI Jun, *et al.* AC tie-line power fluctuation mechanism and peak value calculation for two-area interconnected power systems [J]. **Proceedings of the CSEE**, 2010, **30**(19):1-6. (in Chinese)
- [4] 余晓鹏,张雪敏,钟雨芯,等. 交直流系统连锁故障模型及停电风险分析 [J]. 电力系统自动化, 2014, **38**(19):33-39.
YU Xiaopeng, ZHANG Xuemin, ZHONG Yuxin, *et al.* Cascading failure model of AC-DC system and blackout risk analysis [J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2014, **38**(19):33-39. (in Chinese)
- [5] 汤涌,卜广全,易俊. 印度“7.30”、“7.31”大停电事故分析及启示 [J]. 中国电机工程学报, 2012, **32**(25):167-174.
TANG Yong, BU Guangquan, YI Jun. Analysis and lessons of the blackout in Indian power grid on July 30 and 31, 2012 [J]. **Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering**, 2012, **32**(25):167-174. (in Chinese)
- [6] 孙士云,束洪春,杨毅,等. 云电送粤特高压输电网络连锁故障分析 [J]. 高电压技术, 2009, **35**(2):205-210.
SUN Shiyun, SHU Hongchun, YANG Yi, *et al.* Analysis on cascading outages of Yunnan-Guangdong ultra-high voltage transmission grid [J]. **High Voltage Engineering**, 2009, **35**(2):205-210. (in Chinese)
- [7] 李国栋,皮俊波,郑力,等. ± 500 kV 林枫直流双极闭锁故障案例仿真分析 [J]. 电网技术, 2014, **38**(4):877-881.
LI Guodong, PI Junbo, ZHENG Li, *et al.* Simulation analysis on case of bipolar blocking in ± 500 kV EHVDC power transmission line from Tuanlin to Fengjing [J]. **Power System Technology**, 2014, **38**(4):877-881. (in Chinese)
- [8] RAMANATHAN R, RAMCHANDANI H, SACKETT S A. Dynamic load flow technique for power-system simulators [J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 1986, **1**(3):25-30.
- [9] 袁启海,薛巍,王心丰,等. 调度员培训仿真系统中动态潮流的改进及完善 [J]. 电力系统自动化, 1999, **23**(23):20-22.
YUAN Qihai, XUE Wei, WANG Xinfeng, *et al.* The improvement of dynamic power flow calculation in dispatcher training simulator (DTS) system [J]. **Automation of Electric Power Systems**, 1999, **23**(23):20-22. (in Chinese)
- [10] 张海波,张伯明,孙宏斌. 基于异步迭代的多区域互联系统动态潮流分解协调计算 [J]. 电力系统自动化, 2003, **27**(24):1-5,9.
ZHANG Haibo, ZHANG Boming, SUN Hongbin. A decomposition and coordination dynamic power flow calculation for multi-area interconnected system based on asynchronous iteration [J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2003, **27**(24):1-5,9. (in Chinese)

- [11] 李娟, 高中文, 纪延超. 短时间步长动态潮流算法的研究 [J]. 电机与控制学报, 2003, 7(2):174-176.
LI Juan, GAO Zhongwen, JI Yanchao. Investigation on dynamic load flow of short time step [J]. *Electric Machines and Control*, 2003, 7(2):174-176. (in Chinese)
- [12] 余小燕, 于继来. 基于有功无功联合调整的动态潮流 [J]. 电网技术, 2005, 29(22):61-65.
YU Xiaoyan, YU Jilai. A dynamic power flow algorithm with joint regulation of active and reactive power [J]. *Power System Technology*, 2005, 29(22):61-65. (in Chinese)
- [13] 张海波, 张晓云. 基于异步迭代的交直流互联系统分布式动态潮流计算 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(18):33-36.
ZHANG Haibo, ZHANG Xiaoyun. Distributed dynamic power flow for AC/DC interconnected power grid based on asynchronous iteration mode [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2009, 33(18):33-36. (in Chinese)
- [14] 孙宏斌, 李钦, 张明晔, 等. 基于动态潮流方程的连续潮流模型与方法 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(7):77-82.
SUN Hongbin, LI Qin, ZHANG Mingye, et al. Continuation power flow method based on dynamic power flow equation [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(7):77-82. (in Chinese)

A dynamic load flow model with results irrelevant to position selection of slack bus

SHEN Jiakai¹, MU Yongqiang², WANG Chunsheng³, WANG Yong²,
WANG Hefei⁴, ZHANG Rongrong¹, LI Weidong^{*1}

- (1. School of Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. State Grid Liaoning Electric Power Co. Ltd., Shenyang 110006, China;
3. Economic Research Institute of State Grid Liaoning Electric Power Co. Ltd., Shenyang 110015, China;
4. Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

Abstract: In UHV AC/DC hybrid power system operation, the load flow pattern and its trend should be recognized for earlier decision to ensure the safe and stable operation. The existing load flow methods have limitations, such as the calculation results being relevant to the position selection of the slack bus, or no considering the frequency dynamic process. A dynamic load flow model with results irrelevant to position selection of the slack bus is proposed, in which frequency is introduced as a variable in the traditional load flow model. In the new model, the variables which associated with frequency changes, such as inertia, power-frequency characteristic of generator and load, system active power loss, are coordinated and solved in a set of simultaneous equations. This ensures the power deviation of the generators including the slack bus is in proportion to frequency deviation, with which the problem of the traditional load flow model, whose calculation results are relevant to the position selection of the slack bus, is solved. Numerical simulation results of IEEE-39 node test system show that the calculation results are not depend on the position selection of the slack bus and fast computational speed can meet the on-line operation requirement.

Key words: dynamic load flow; slack bus; UHV AC/DC hybrid power system; high-power deficiency