

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200384

适用于电力系统暂态稳定分析的网络电压解析算法研究

康卓然, 张谦, 陈民权, 甘德强

(浙江大学电气工程学院电机系, 浙江 杭州 310027)

摘要: 工程上大量采用数值仿真方法分析系统运行稳定性, 通过交替迭代求解微分-代数方程组来评估系统是否稳定, 但解析程度低是其固有的缺点。为了弥补这一不足, 利用 Dommel-Sato 迭代, 针对不同的负荷模型, 提出了一种求解网络电压封闭解的解析方法。该方法可以将暂态稳定分析数学模型中的微分方程与代数方程解耦, 使得稳定问题转化为求解全微分方程组, 避免了求解过程的交替迭代。在此基础上, 利用网络电压的封闭解, 提出了一种快速计算系统故障后短期电压的方法。通过与 PSD-BPA 仿真结果进行比较, 表明了所提方法能快速、准确地计算系统故障后的短期电压。

关键词: Dommel-Sato 迭代; 网络方程; 离散线性系统; 非线性负荷; 稳定分析

Research on network voltage analysis algorithm suitable for power system transient stability analysis

KANG Zhuoran, ZHANG Qian, CHEN Minquan, GAN Deqiang

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In engineering, the main method used to analyze the stability of a system is to solve a set of differential-algebraic equations by alternating iterative methods, but the low degree of analysis is its inherent disadvantage. In order to make up for this shortcoming, an analytical method for solving the network voltage closed solution is proposed for different load models using the Dommel-Sato iteration. This method can decouple the differential equation and the algebraic equation in the mathematical model, and then the mathematical model of transient stability analysis is transformed from the differential-algebraic equations to total differential equations, avoiding the alternating iteration of the solution process. Based on the closed solution of the network voltage, a method for quickly calculating the short-term voltage after a system fault is proposed. Comparison with the PSD-BPA simulation results shows that the method can quickly and accurately calculate the short-term voltage after a system fault.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900600).

Key words: Dommel-Sato iteration; network equation; discrete system; nonlinear load; stability analysis

0 引言

传统电力系统在遭受大扰动后会导致电网出现电压异常、功率失衡或者潮流转移, 容易引起电网功角摇摆、电压异常与频率异常。针对传统交直流电力系统的大扰动问题, 国内外学者已经做了大量的研究并取得了很大进展^[1-2]。但近些年我国电网结构愈加复杂^[3-9], 这种复杂结构使得大扰动后系统的稳定性面临严峻挑战^[10-12]。

对大扰动稳定性分析方法的研究非常多, 总体上可大致分为三类: 第一类方法基于数值仿真结果;

第二类方法基于李亚普诺夫直接法原理; 第三类方法基于数学逼近的解析方法。数值仿真法^[13-16]目前广泛应用于工程中的机电暂态大扰动稳定分析, 但无法解析是其固有的缺点; 直接法^[17-19]形式简洁、计算速度快, 但对于大规模复杂电网, 其保守性及合适的李雅普诺夫函数的选取是其应用的主要障碍; 解析法^[20-23]可以聚焦稳定裕度指标与参数的关系, 但侵入式解析解法^[24]无法利用商业软件, 非侵入式解析解法^[25]难以借助电网的结构特征开展稳定分析。

按照《电力系统安全稳定导则》^[26]的规定, 电力系统大扰动稳定包含大扰动功角稳定与大扰动电压稳定, 大扰动功角稳定包含暂态稳定与大扰动功

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2016YFB0900600)

态稳定, 本文讨论的大扰动稳定主要针对电力系统暂态稳定。电力系统暂态稳定分析对应的数学模型是一组微分-代数方程^[27]。目前的数学方法中, 微分-代数方程组的分析方法远没有单纯的微分方程组的分析方法成熟。因此, 本文针对交流电网, 提出了一种对网络方程的处理方法, 该方法可以得到网络电压的封闭解, 进而将暂态稳定分析的数学模型由微分-代数方程组转化为全微分方程组, 并利用网络电压的封闭解, 提出了一种快速计算系统故障后短期电压的方法。最后采用 IEEE 9 节点标准算例, 证明了这一分析方法的有效性。

1 暂态稳定分析中网络方程的处理方法

1.1 Dommel-Sato 迭代

1972 年, H.W.Dommel 与 N.Sato 两位学者提出了基于梯形积分的暂态稳定仿真计算方法^[28], 这种基于仿真的稳定分析方法一直被广泛使用至今, 现有的商业软件也大都使用这个方法, 其迭代格式如式(1)所示。

$$\mathbf{X}^{(k)} = \mathbf{b} + \mathbf{A}\bar{\mathbf{X}}^{(k-1)} \quad (1)$$

式中: \mathbf{X} 为待求向量; $\bar{\mathbf{X}}$ 为待求向量 \mathbf{X} 的共轭向量(其他向量和矩阵的共轭值采用类似定义); \mathbf{b} 为系数向量; \mathbf{A} 为系数矩阵; k 为迭代次数。

对于复数矩阵 \mathbf{Z} 、 \mathbf{W} , 满足运算公式如式(2)所示。

$$\overline{\mathbf{Z} + \mathbf{W}} = \overline{\mathbf{Z}} + \overline{\mathbf{W}}, \quad \overline{\mathbf{Z}\mathbf{W}} = \overline{\mathbf{Z}}\overline{\mathbf{W}} \quad (2)$$

故可以将式(1)的计算过程罗列为

$$\begin{cases} \mathbf{X}^{(1)} = \mathbf{b} + \mathbf{A}\bar{\mathbf{X}}^{(0)} \\ \mathbf{X}^{(2)} = \mathbf{b} + \mathbf{A}\bar{\mathbf{X}}^{(1)} = \mathbf{b} + \mathbf{A}\bar{\mathbf{b}} + \mathbf{A}\bar{\mathbf{A}}\bar{\mathbf{X}}^{(0)} \\ \mathbf{X}^{(3)} = \mathbf{b} + \mathbf{A}\bar{\mathbf{X}}^{(2)} = \mathbf{b} + \mathbf{A}\bar{\mathbf{b}} + \mathbf{A}\bar{\mathbf{A}}\bar{\mathbf{b}} + \mathbf{A}\bar{\mathbf{A}}\bar{\mathbf{A}}\bar{\mathbf{X}}^{(0)} \\ \vdots \end{cases} \quad (3)$$

为了叙述的方便, 下面先给出矩阵幂级数的有关定义和定理^[29]。

定义 1(矩阵谱半径): 设矩阵 $\mathbf{A} \in \mathbf{C}^{m \times n}$, \mathbf{A} 具有 n 个特征值 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$, 则称矩阵 \mathbf{A} 的谱半径 $\rho(\mathbf{A}) = \max\{|\lambda_1|, |\lambda_2|, \dots, |\lambda_n|\}$, 即矩阵 \mathbf{A} 的谱半径为其特征值模的最大值。

定义 2(矩阵幂级数): 设方阵 $\mathbf{A} \in \mathbf{C}^{n \times n}$, 那么称

$\sum_{k=0}^{\infty} c_k \mathbf{A}^k$ 为矩阵 \mathbf{A} 的幂级数; 特别的, 称 $\sum_{k=0}^{\infty} \mathbf{A}^k$ 为矩阵 \mathbf{A} 的 Neumann 级数。

定理 1(Neumann 级数收敛的充要条件): Neumann 级数 $\sum_{k=0}^{\infty} \mathbf{A}^k$ 收敛的充要条件是矩阵 \mathbf{A} 的谱半径小于

1, 且在收敛时级数和为 $(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}$ 。

当采用式(3)的迭代形式求解稳定问题时, 迭代的收敛判据是矩阵 $\mathbf{A}\bar{\mathbf{A}}$ 的谱半径小于 1, 即 $\rho(\mathbf{A}\bar{\mathbf{A}}) < 1$; 并且矩阵 $\mathbf{A}\bar{\mathbf{A}}$ 的谱半径越小, 收敛速度越快。

当迭代收敛时, 矩阵 $\mathbf{A}\bar{\mathbf{A}}$ 具有压缩映射性质, 其高次幂的范数趋近于 0, 即 $\lim_{k \rightarrow \infty} \|(\mathbf{A}\bar{\mathbf{A}})^k\| = \mathbf{0}$ 。这一性质决定了迭代结果与待求量的初值 $\mathbf{X}^{(0)}$ 无关。由此, 上述迭代序列的最后一项可以写为

$$\mathbf{X}^{(k)} = \left[\mathbf{I} + \mathbf{A}\bar{\mathbf{A}} + (\mathbf{A}\bar{\mathbf{A}})^2 + \dots \right] (\mathbf{b} + \mathbf{A}\bar{\mathbf{b}}) \quad (4)$$

因此, 当矩阵 $\mathbf{A}\bar{\mathbf{A}}$ 的谱半径小于 1 时, 式(4)具有如下的封闭形式。

$$\mathbf{X} = (\mathbf{I} - \mathbf{A}\bar{\mathbf{A}})^{-1} (\mathbf{b} + \mathbf{A}\bar{\mathbf{b}}) \quad (5)$$

1.2 网络电压表达式

在暂态稳定分析中, 当电力网络采用节点电压方程的复数形式描述时, 可以将暂态稳定的数学模型表示如式(6)所示。

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{V}) \\ \mathbf{Y}\mathbf{V} = \mathbf{I}(\mathbf{x}, \mathbf{V}) \end{cases} \quad (6)$$

式中: \mathbf{x} 代表状态变量; \mathbf{V} 代表网络电压。

当电网中不存在广域控制时, 各个元件都取局部电压和频率作为反馈量, 这时式(6)中的微分方程是分块解耦的, 通过网络方程 $\mathbf{Y}\mathbf{V} = \mathbf{I}$ 耦合起来。因此, 如果得到网络电压的解析表达式, 则可以将暂态稳定的数学模型由式(6)转化为全微分方程组。

接下来分别推导负荷采用典型的恒定阻抗模型、恒定电流模型、恒定功率模型时的网络电压封闭解。

1) 恒定阻抗负荷下的网络电压解

发电机采用三阶实用模型, 不考虑发电机定子电阻时, 第 i 台发电机的注入电流表达式如式(7)所示^[27]。

$$I_{Gi} = -jX_{di}'^{-1} E_{qi}' e^{j\delta_i} - j0.5(X_{qi}' - X_{di}'^{-1}) e^{j2\delta_i} \bar{V}_{Gi} \quad (7)$$

式中: X_{di}' 和 X_{qi}' 分别表示第 i 台发电机的直轴暂态电抗和交轴同步电抗; E_{qi}' 表示第 i 台发电机的与转子励磁绕组成正比的暂态电势; δ_i 表示第 i 台发电机的功角。

将上式代入网络电压方程中, 可以得到式(8)。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{GG} & \mathbf{Y}_{GL} \\ \mathbf{Y}_{LG} & \mathbf{Y}_{LL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_G \\ \mathbf{V}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -j\mathbf{X}_d'^{-1} \mathbf{E}_q' e^{j\delta} - j0.5(\mathbf{X}_q'^{-1} - \mathbf{X}_d'^{-1}) e^{j2\delta} \bar{\mathbf{V}}_G \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: 下标 G 对应发电机节点; 下标 L 对应联络节点和负荷节点; \mathbf{X}_d' 和 \mathbf{X}_q' 分别表示发电机直轴暂态

电抗和交轴同步电抗对应的对角矩阵； \mathbf{E}'_q 表示发电机暂态电势对应的对角矩阵； δ 表示发电机功角对应的向量。因为负荷采用恒定阻抗模型，所以负荷节点对应的注入电流为零。

将式(8)展开，消去中间变量 \mathbf{V}_L 后可写为

$$\mathbf{V} = \mathbf{b} + \mathbf{A}\bar{\mathbf{V}} \quad (9)$$

式中：

$$\mathbf{b} = \mathbf{Y}^{-1} \begin{bmatrix} -j\mathbf{X}'_d{}^{-1}\mathbf{E}'_q e^{j\delta} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A} = \mathbf{Y}^{-1} \begin{bmatrix} -j0.5(\mathbf{X}'_q{}^{-1} - \mathbf{X}'_d{}^{-1})e^{j2\delta} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix}$$

现假设矩阵 \mathbf{A} 满足 $\rho(\mathbf{A}\bar{\mathbf{A}}) < 1$ ，则可以利用式(5)得到节点电压解的封闭形式，如式(10)所示。

$$\mathbf{V} = (\mathbf{I} - \mathbf{A}\bar{\mathbf{A}})^{-1} (\mathbf{b} + \mathbf{A}\bar{\mathbf{b}}) \quad (10)$$

至此，得到了交流电网下，当负荷采用恒定阻抗模型时，网络电压解的封闭形式。

2) 恒定电流负荷下的网络电压解

负荷采用恒定电流模型时，网络电压方程可写为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{GG} & \mathbf{Y}_{GL} \\ \mathbf{Y}_{LG} & \mathbf{Y}_{LL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_G \\ \mathbf{V}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -j\mathbf{X}'_d{}^{-1}\mathbf{E}'_q e^{j\delta} - j0.5(\mathbf{X}'_q{}^{-1} - \mathbf{X}'_d{}^{-1})e^{j2\delta}\bar{\mathbf{V}}_G \\ \mathbf{I}_L \end{bmatrix} \quad (11)$$

上式可以整理为

$$\mathbf{V} = \mathbf{b} + \mathbf{A}\bar{\mathbf{V}} \quad (12)$$

式中： $\mathbf{b} = \mathbf{Y}^{-1} \begin{bmatrix} -j\mathbf{X}'_d{}^{-1}\mathbf{E}'_q e^{j\delta} \\ \mathbf{I}_L \end{bmatrix}$ ，矩阵 \mathbf{A} 与式(9)一致。

至此，得到了交流电网下，当负荷采用恒定电流模型时，网络电压解的封闭形式。

3) 恒定功率负荷下的网络电压解

电力系统暂态稳定分析中，当负荷采用恒定功率模型时，网络电压方程可写为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{GG} & \mathbf{Y}_{GL} \\ \mathbf{Y}_{LG} & \mathbf{Y}_{LL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_G \\ \mathbf{V}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -j\mathbf{X}'_d{}^{-1}\mathbf{E}'_q e^{j\delta} - j0.5(\mathbf{X}'_q{}^{-1} - \mathbf{X}'_d{}^{-1})e^{j2\delta}\bar{\mathbf{V}}_G \\ (\text{diag}\bar{\mathbf{V}}_L)^{-1}\bar{\mathbf{S}}_L \end{bmatrix} \quad (13)$$

可以将上式整理为

$$\mathbf{V} = (\mathbf{U}\mathbf{Y})^{-1}\mathbf{b}' + (\mathbf{U}\mathbf{Y})^{-1}\mathbf{A}'\bar{\mathbf{V}} \quad (14)$$

式中：

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & (\text{diag}\bar{\mathbf{V}}_L) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{b}' = \begin{bmatrix} -j\mathbf{X}'_d{}^{-1}\mathbf{E}'_q e^{j\delta} \\ \bar{\mathbf{S}}_L \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}' = \begin{bmatrix} -j0.5(\mathbf{X}'_q{}^{-1} - \mathbf{X}'_d{}^{-1})e^{j2\delta} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix}$$

若令 $\mathbf{b} = (\mathbf{U}\mathbf{Y})^{-1}\mathbf{b}'$ ， $\mathbf{A} = (\mathbf{U}\mathbf{Y})^{-1}\mathbf{A}'$ ，并应用 Dommel-Sato 迭代，可以得到

$$\begin{cases} \mathbf{V}^{(1)} = \mathbf{b}^{(0)} + \mathbf{A}\bar{\mathbf{V}}^{(0)} \\ \mathbf{V}^{(2)} = \mathbf{b}^{(1)} + \mathbf{A}\bar{\mathbf{V}}^{(1)} \\ \mathbf{V}^{(3)} = \mathbf{b}^{(2)} + \mathbf{A}\bar{\mathbf{V}}^{(2)} \\ \vdots \end{cases} \quad (15)$$

这时，因为向量 \mathbf{b} 与待求量 \mathbf{V} 有关，在每一次迭代时要随电压 \mathbf{V} 的改变而改变，所以无法直接应用式(5)得到电压的封闭解。但可以近似认为向量 \mathbf{b} 在两次迭代后保持不变，此时可以得到节点电压解的封闭形式，如式(16)所示。

$$\mathbf{V} \approx (\mathbf{I} - \mathbf{A}\bar{\mathbf{A}})^{-1} (\mathbf{b}^{(2)} + \mathbf{A}\bar{\mathbf{b}}^{(2)}) \quad (16)$$

至此，得到了交流电网下，当负荷采用恒定功率模型时，网络电压解的封闭形式。

通过以上推导出的网络电压封闭解，可以将暂态稳定的数学模型由微分代数方程组转化为全微分方程组。从而，在进行暂态稳定分析时，无需考虑微分方程与代数方程间的相互迭代，可直接应用数值积分方法求解全微分方程组进行分析计算。

2 离散线性系统

快速计算电力系统故障暂态对电网电压的影响，对于电网紧急状态的预防控制与实时控制具有重要意义。现代常规继电保护快速段动作时间大约 20 ms，超高速保护动作时间大约 5 ms，断路器切除故障时间一般 3 到 4 个周波(60~80 ms)，总的故障切除时间大约在 100 ms 到 120 ms。因此，快速计算系统故障后 100 ms 内的电压具有重要意义。

当发电机采用三阶实用模型，负荷采用恒定阻抗模型，励磁系统选用一阶励磁模型时，可以得到发电机组的总模型^[30]。

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega - 1 \\ T_J \dot{\omega} = T_M - E'_q I_q - \Delta X_{qd} I_d I_q \\ T'_{do} \dot{E}'_q = E_{fd} - E'_q - \Delta X_{dd} I_d \\ T_A \dot{E}_{fd} = K_A \Delta V - E_{fd} \\ 0 = V \sin(\delta - \theta) - X_q I_q \\ 0 = E'_q - V \cos(\delta - \theta) - X'_d I_d \end{cases} \quad (17)$$

式中： T_J 表示机组惯性时间常数； T_M 表示原动机输出的机械转矩； T'_{do} 表示直轴开路暂态时间常数； E_{fd}

表示定子励磁电动势; X_d 表示直轴同步电抗; T_A 表示励磁系统时间常数; K_A 表示励磁系统电压调节器增益; V 表示发电机端电压幅值; I_d 和 I_q 分别表示电流的直轴分量与交轴分量; $\Delta X_{qd} = X_q - X'_d$; $\Delta X_{dd} = X_d - X'_d$; $\Delta V = V_{\text{ref}} - V$, V_{ref} 表示励磁系统参考电压。模型中包含发电机模型、励磁系统模型与网络接口方程。

当对系统故障后 100 ms 内进行分析时, 因为发电机组的惯性时间常数比较大, 所以可以近似认为 ω 保持不变, 进而可以近似认为功角 δ 保持不变。但是因为励磁系统的时间常数 T_A 较小, 所以励磁机需要详细的模型。因此, 可以将上述模型简化为

$$\begin{cases} T'_{do} \dot{E}'_q = E_{fd} - E'_q - \Delta X_{dd} I_d \\ T_A \dot{E}_{fd} = K_A \Delta V - E_{fd} \\ 0 = E'_q - V \cos(\delta - \theta) - X'_d I_d \end{cases} \quad (18)$$

模型中包含两个状态变量 E'_q 、 E_{fd} 以及两个代数数量 V 、 I_d 。现对代数数量进行处理:

1) 对电压幅值 V 的处理

交流电网下, 负荷采用恒定阻抗模型时, 利用式(10)可以得到发电机节点电压的复数形式为

$$\mathbf{V}_G = (\mathbf{I} - \mathbf{A}\bar{\mathbf{A}})^{-1} (\mathbf{b} + \mathbf{A}\bar{\mathbf{b}}) \quad (19)$$

式中: $\mathbf{A} = -j0.5(\mathbf{Y}_{GG} - \mathbf{Y}_{GL} \mathbf{Y}_{LL}^{-1} \mathbf{Y}_{LG})^{-1} (\mathbf{X}_q^{-1} - \mathbf{X}'_d^{-1}) e^{j2\delta}$;

$\mathbf{b} = -j(\mathbf{Y}_{GG} - \mathbf{Y}_{GL} \mathbf{Y}_{LL}^{-1} \mathbf{Y}_{LG})^{-1} \mathbf{X}'_d^{-1} \mathbf{E}'_q e^{j\delta}$ 。

在认为功角保持不变时, 发电机节点电压的实部、虚部与 E'_q 的关系均是线性的。所以, 可以得到发电机节点电压幅值与 E'_q 的表达式。

因为 E'_q 表示的是与转子励磁绕组成正比的暂态电势, 所以 E'_q 与发电机节点电压幅值 V 存在单调关系。又因为系统发生故障后 100 ms 内, E'_q 数值与其初始值相比变化不大, 所以可选取 E'_q 在 0+时刻的值作为泰勒展开点, 对电压幅值 V 进行一阶泰勒展开, 得到电压幅值 V 与 E'_q 的线性关系式。

$$\mathbf{V} = \mathbf{K}_1 + \mathbf{K}_2 \mathbf{E}'_q \quad (20)$$

式中, \mathbf{K}_1 、 \mathbf{K}_2 为系数矩阵。

2) 对电流 I_d 的处理

由式(19)中的网络接口方程, 可以得到 I_d 的表达式为

$$\mathbf{I}_d = \mathbf{X}'_d^{-1} (\mathbf{E}'_q - \mathbf{V} \cos \theta \cos \delta - \mathbf{V} \sin \theta \sin \delta) \quad (21)$$

式中, $\mathbf{V} \cos \theta$ 、 $\mathbf{V} \sin \theta$ 分别是发电机节点电压的实部、

虚部, 均为 E'_q 的线性函数。

由式(20)可直接分离出发电机节点电压实部、虚部的表达式, 简写为

$$\begin{cases} \mathbf{V} \cos \theta = \mathbf{K}_3 \mathbf{E}'_q \\ \mathbf{V} \sin \theta = \mathbf{K}_4 \mathbf{E}'_q \end{cases} \quad (22)$$

式中, \mathbf{K}_3 、 \mathbf{K}_4 为系数矩阵。

将式(23)代入式(22)可得

$$\mathbf{I}_d = \mathbf{X}'_d^{-1} (\mathbf{E}'_q - \mathbf{K}_3 \mathbf{E}'_q \cos \delta - \mathbf{K}_4 \mathbf{E}'_q \sin \delta) \quad (23)$$

至此, 将代数数量 \mathbf{V} 、 \mathbf{I}_d 处理完毕, 分别得到了电压幅值 \mathbf{V} 、电流 \mathbf{I}_d 与状态量 \mathbf{E}'_q 的线性关系表达式。

将式(21)与式(24)代入模型(19)中, 可以将系统模型的代数方程消去使之成为全微分方程组, 应用改进欧拉法对微分方程进行求解, 可以得到关于状态量的离散线性系统。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E}'_q \\ \mathbf{E}_{fd} \end{bmatrix}^n = \mathbf{G} \begin{bmatrix} \mathbf{E}'_q \\ \mathbf{E}_{fd} \end{bmatrix}^{n-1} + \mathbf{u} \quad (24)$$

式中: 矩阵 \mathbf{G} 为常数矩阵; 向量 \mathbf{u} 为常数向量。

令 $\mathbf{x}(n) = [\mathbf{E}'_q^n, \mathbf{E}_{fd}^n]^T$, 可以得到离散线性系统的解析解为

$$\mathbf{x}(n) = \mathbf{G}^n \mathbf{x}(0) + \sum_{i=0}^{n-1} \mathbf{G}^{n-i-1} \mathbf{u} \quad (25)$$

在用离散线性系统快速计算出状态量 \mathbf{E}'_q 后, 可以利用发电机节点电压幅值 V 与 E'_q 的线性关系式, 直接得到电压幅值的大小。

上述离散线性系统具有两个优点: 第一, 传统暂态稳定分析时, 通过对微分方程和代数方程的交替迭代, 得到的是状态量的数值解, 缺少物理意义, 而离散线性系统得到的是状态量的离散解析解, 具有一定的物理意义。第二, 离散线性系统在计算状态量时, 无需考虑微分方程与代数方程的交替求解过程, 加快了计算速度。

3 算例分析

本节采用 IEEE 9 节点标准算例, 对离散线性系统计算出的状态量与 PSD-BPA 仿真结果进行比较, 验证本文计算方法的有效性。IEEE 9 节点系统接线图以及相关数据如图 1 所示^[31]。

现比较系统发生三相短路故障、切负荷操作时, 本文方法与 BPA 软件对于状态量的计算结果。

1) 三相短路故障

故障设置: 系统在零秒时, 线路 5-7 靠近母线 7 处发生三相接地短路, 故障持续 5 个周波。

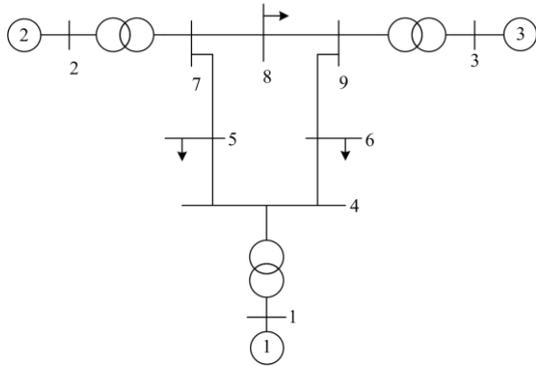


图 1 IEEE 9 节点系统接线图

Fig. 1 Wiring diagram of IEEE 9 bus system

表 1 发电机参数

Table 1 Parameters of the generator

发电机	参数					控制参数	
	R_a	X_d	X'_d	X_q	T'_{d0}	T_A	K_A
G1	0.0	0.146	0.061	0.097	8.96	20.0	0.1
G2	0.0	0.896	0.120	0.865	6.00	20.0	0.1
G3	0.0	1.313	0.181	1.258	5.89	20.0	0.1

状态量 E'_q 、 E'_{fd} 的计算与仿真结果如图 2、图 3 所示。

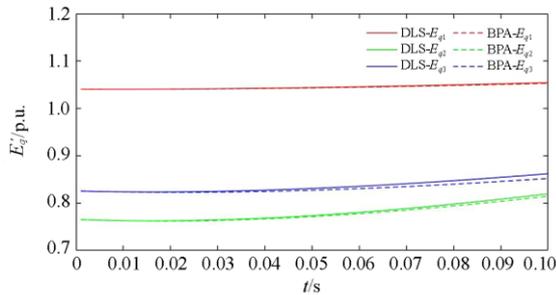


图 2 三相短路故障时 E'_q 计算与仿真结果

Fig. 2 E'_q calculation and simulation results for three-phase short-circuit fault

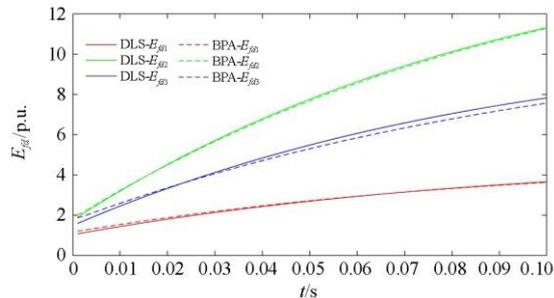


图 3 三相短路故障时 E'_{fd} 计算与仿真结果

Fig. 3 E'_{fd} calculation and simulation results for three-phase short-circuit fault

在计算出状态量 E'_q 的值后，通过式(21)可以直接得到对应的电压幅值，结果如图 4 所示。

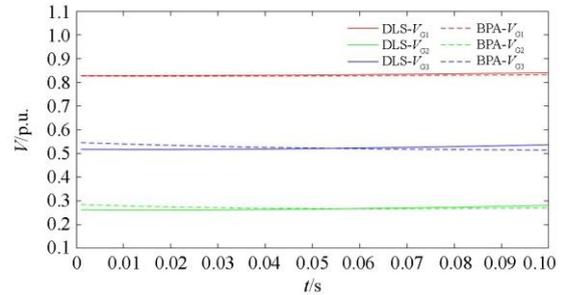


图 4 三相短路故障时 V 计算与仿真结果

Fig. 4 V calculation and simulation results for three-phase short-circuit fault

由图 4 可见，三相短路故障后 100 ms 内，离散线性系统计算出的状态量、电压幅值与 BPA 仿真结果基本一致。

2) 切负荷操作

操作设置：系统在零秒时，将节点 5 上的恒定阻抗负荷切除。

状态量 E'_q 、 E'_{fd} 的计算与仿真结果如图 5、图 6 所示。

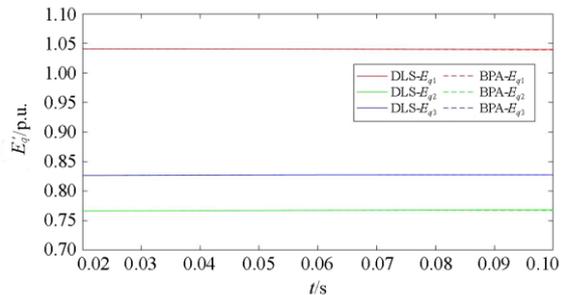


图 5 切负荷操作时 E'_q 计算与仿真结果

Fig. 5 E'_q calculation and simulation results for load shedding

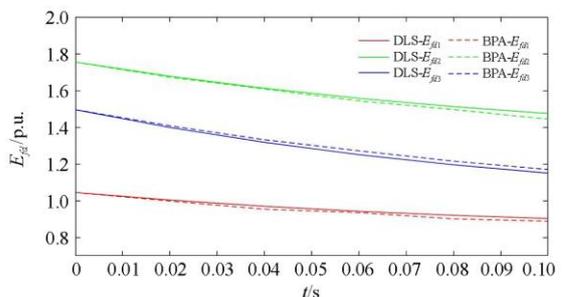


图 6 切负荷操作时 E'_{fd} 计算与仿真结果

Fig. 6 E'_{fd} calculation and simulation results for load shedding

对于切负荷操作, 因为操作后三个发电机节点的电压值很接近, 在此不画出 V_G 的变化趋势, V_G 可通过式(21)求出。

离散线性系统模型计算状态量的速度快, 但这一模型存在两个近似: 第一, 认为故障发生后短期内电角速度 ω 与功角 δ 保持不变; 第二, 对电压幅值进行了一阶泰勒展开, 近似得到了电压幅值与 E'_q 的线性关系式。因此, 当研究故障发生后较长时段以至于不能忽视电角速度 ω 与功角 δ 变化时, 本模型将不再适用。

4 结论

本文根据 Dommel-Sato 迭代的迭代格式, 推导出 Dommel-Sato 迭代中待求量解的封闭形式, 给出了决定 Dommel-Sato 迭代收敛性和收敛速度的关键数学指标——谱半径。针对不同的负荷模型, 给出了网络电压的封闭解。利用网络电压的封闭解, 推导出一种计算系统状态量的离散线性系统, 进而可以快速计算出网络电压。采用 IEEE 9 节点标准算例, 对离散线性系统计算出的状态量与 PSD-BPA 仿真结果进行了比较, 验证了所提方法的有效性。

参考文献

- [1] 李婷, 胥威汀, 刘向龙, 等. 含高比例可再生能源的交直流混联电网规划技术研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(12): 177-187.
LI Ting, XU Weiting, LIU Xianglong, et al. Review on planning technology of AC/DC hybrid system with high proportion of renewable energy[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(12): 177-187.
- [2] 辛建波, 王玉麟, 舒展, 等. 特高压交直流入对江西电网暂态稳定的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(8): 71-79.
XIN Jianbo, WANG Yulin, SHU Zhan, et al. Transient stability impact analysis of UHV AC/DC access to Jiangxi power grid[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(8): 71-79.
- [3] 刘卫东, 李奇南, 王轩, 等. 大规模海上风电柔性直流输电技术应用现状和展望[J]. 中国电力, 2020, 53(7): 55-71.
LIU Weidong, LI Qinan, WANG Xuan, et al. Application status and prospect of VSC-HVDC technology for large-scale offshore wind farms[J]. Electric Power, 2020, 53(7): 55-71.
- [4] 周原冰, 江涵, 肖晋宇, 等. 清洁低碳发展背景下跨国互联电力系统规划方法[J]. 中国电力, 2020, 53(10): 1-9.
ZHOU Yuanbing, JIANG Han, XIAO Jinyu, et al. Planning methods for transnationally interconnected power systems under the background of clean low-carbon development[J]. Electric Power, 2020, 53(10): 1-9.
- [5] 肖峰, 韩民晓, 唐晓骏, 等. 含大规模光伏并网的弱送端系统的电压稳定性[J]. 中国电力, 2020, 53(11): 31-39.
XIAO Feng, HAN Minxiao, TANG Xiaojun, et al. Voltage stability of weak sending-end system with large-scale grid-connected photovoltaic power plants[J]. Electric Power, 2020, 53(11): 31-39.
- [6] 韩悌, 柯贤波, 霍超, 等. 多直流、高占比新能源电力系统应对严重扰动新技术研究[J]. 智慧电力, 2020, 48(4): 9-14, 27.
HAN Ti, KE Xianbo, HUO Chao, et al. New technology coping with serious disturbance in power system with multiple DC and high ratio new energy[J]. Smart Power, 2020, 48(4): 9-14, 27.
- [7] 应飞祥, 姜燕波, 何民, 等. 含风储系统的电力系统可靠性评估进展与展望[J]. 智慧电力, 2019, 47(2): 1-8, 42.
YING Feixiang, JIANG Yanbo, HE Min, et al. Progress and prospect of reliability assessment of power system with wind farm and energy storage system[J]. Smart Power, 2019, 47(2): 1-8, 42.
- [8] 刘俊, 孙惠文, 吴柳, 等. 电力系统暂态稳定性评估综述[J]. 智慧电力, 2019, 47(12): 44-53, 122.
LIU Jun, SUN Huiwen, WU Liu, et al. Overview of transient stability assessment of power system[J]. Smart Power, 2019, 47(12): 44-53, 122.
- [9] 刘颖英, 冯丹丹, 林才华, 等. 电能质量综合评估研究现状及发展趋势[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(4): 167-176.
LIU Yingying, FENG Dandan, LIN Caihua, et al. Current status and development trend of power quality comprehensive assessment[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(4): 167-176.
- [10] 宋云亭, 高峰. 大规模新能源发电与多直流送端电网协调运行技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- [11] 赵曦君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [12] 杨海涛, 吉平, 苗淼, 等. 未来中国特高压电网结构形态与电源组成相互关系分析[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(6): 9-17.
YANG Haitao, JI Ping, MIAO Miao, et al. Analysis on interrelationship between future UHV power grid structural form and power source composition in China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(6): 9-17.

- [13] 戴汉扬, 汤涌, 宋新立, 等. 电力系统动态仿真数值积分算法研究综述[J]. 电网技术, 2018, 42(12): 3977-3984.
DAN Hanyang, TANG Yong, SONG Xinli, et al. Review on numerical integration algorithms for dynamic simulation of power system[J]. Power System Technology, 2018, 42(12): 3977-3984.
- [14] 汪芳宗, 聂赞. 基于帕德逼近的暂态稳定性快速数值计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 1-6.
WANG Fangzong, NIE Yun. Fast algorithm for transient stability numerical simulation using Pade approximation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 1-6.
- [15] XIN H, GAN D, HUANG Z, et al. Applications of stability-constrained optimal power flow in East China system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(3): 1423-1433.
- [16] SONG X, WANG Z, XIN H, et al. Risk-based coordination of generation rescheduling and load shedding for transient stability enhancement[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 4674-4682.
- [17] FOUAD A A, VITTAL V. Power system transient stability analysis using the transient energy function method[M]. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1991.
- [18] 薛禹胜. 运动稳定性量化理论[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1999.
- [19] CHIANG H D. Direct methods for stability analysis of electric power systems: theoretical foundation, BCU methodologies, and applications[M]. Wiley, 2010.
- [20] HOU Kaiyuan, SHAO Guanghui, WANG Haiming, et al. Research on practical power system stability analysis algorithm based on modified SVM[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(2): 119-125. DOI: 10.1186/s41601-018-0086-0.
- [21] HOCKENBERRY J R, LESIEUTRE B C. Evaluation of uncertainty in dynamic simulations of power system models: the probabilistic collocation method[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(3): 1483-1491.
- [22] HOBSON E, ALLEN G N. Effectiveness of artificial neural networks for first swing stability determination of practical systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(2): 1062-1068.
- [23] SHI P, ZHOU J, GAN D, et al. A rational fractional representation method for wind power integrated power system parametric stability analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6): 7122-7131.
- [24] XIA B, WU H, QIU Y, et al. A Galerkin method-based polynomial approximation for parametric problems in power system transient analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(2): 1620-1629.
- [25] 赖全怡, 陈民权, 李尚远, 等. 含高密度光伏电源的受端电网暂态电压有理分式拟合分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(11): 3186-3194.
LAI Quanyi, CHEN Minquan, LI Shangyuan, et al. Transient voltage analysis for receiving power system with high PV penetration based on rational fraction fitting method[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(11): 3186-3194.
- [26] 中国国家标准化管理委员会. 电力系统安全稳定导则(征求意见稿)[S]. 北京: 中华人民共和国国家能源局, 2019.
- [27] 王锡凡, 杜正春, 方万良. 现代电力系统分析[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [28] DOMMEL H W, SATO N. Fast transient stability solutions[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1972, PAS-91(4): 1643-1650.
- [29] QUARTERONI A, SACCO R, SALERI F. Numerical mathematics[M]. Dordrecht: Springer Science + Business Media, 2000.
- [30] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [31] ANDERSON P M, FOUAD A A. Power system control and stability[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2008.

收稿日期: 2020-04-11; 修回日期: 2020-05-20

作者简介:

康卓然(1995—), 男, 硕士, 研究方向为电力系统运行与控制。E-mail: kangzhuoran@zju.edu.cn

(编辑 张爱琴)