

基于源-荷功率动态匹配的海上平台电力系统 静态电压稳定分析

王艳松¹, 宣德之¹, 李强²

(1. 中国石油大学(华东) 新能源学院, 山东 青岛 266580; 2. 中海石油(中国)有限公司, 北京 100027)

摘要:对海上平台电力系统进行静态电压稳定分析是保证其安全性、可靠性的前提。针对海上平台电力系统多平衡节点特征,基于透平发电机组和旋转负荷群的源-荷特性建立计及源-荷功率动态匹配特性的扩展连续潮流模型;针对海上平台电力系统的机组小容量特征和旋转负荷的生产要求,基于机组出力和节点电压的限值确立静态电压稳定分析边界约束;推导扩展连续潮流增广雅可比矩阵,提出基于牛顿-拉夫逊法的静态电压稳定分析方法。对某海上平台电力系统的静态电压稳定分析结果表明,与传统牛顿-拉夫逊法相比,所提方法不仅能找出随负荷增加的电压薄弱节点,且能给出各机组适应负荷增加的出力值。

关键词:静态电压稳定;多平衡节点;连续潮流;源-荷功率动态匹配;增广雅可比矩阵

中图分类号:TM 711

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202102017

0 引言

海上平台电力系统作为油气开采的动力源,其可靠高效运行是海洋资源开发与输送的重要保障。海上平台电力系统网络拓扑一般为简单环网或辐射状网络,其发电设备为多机共母线结构的燃气透平发电机组^[1],装机容量小于陆上配电系统^[2]。海上平台用电设备主要以注水泵、外输泵、压缩机等高压旋转负荷群为主,负荷启停冲击大于陆上电力系统。随着海上油田的滚动式开发以及海上平台电力组网的推进建设,海上平台电力负荷需求不断增长,静态电压稳定问题越来越重要。

目前,国内外学者对于电力系统静态电压稳定分析已开展大量研究。静态电压稳定分析一般基于恒功率因数负荷^[3-5]研究负荷增加时电压的变化情况。针对发电机的静态特性,可计及有功-频率、无功-电压特性^[6]建立发电机模型。文献^[7]考虑发电机功频静特性,提出以负荷节点电压和电源电压之间的网络灵敏度对系统增加的负荷在各发电机间进行分配调度的静态电压稳定分析方法。针对负荷的静态特性^[8]和动态特性^[9],应用广泛的模型包括幂函数模型、多项式模型和感应电动机模型。文献^[10]计及负荷的静态电压特性和频率特性,采用表征系统运行点离电压崩溃点距离的最小奇异值指标分析薄弱节点和薄弱区域。文献^[11]计及泵类负载机械特性对静态电压稳定的影响,建立将感应电动机T型等效电路与泵类负载机械特性相结合的感应电动机负荷模型。针对发电机无功出力约束对静态

电压稳定分析的影响,文献^[12]考虑发电机无功出力极限,对发电机节点进行PQ节点转换,基于改进连续潮流法进行静态电压稳定分析。文献^[13]基于电压控制分区的区域定义发电机无功备用,分析衡量区域发电机无功备用对静态电压稳定的作用。文献^[14]考虑多台发电机无功出力的限制,提出基于节点电压相角和无功为已知量的AQ节点的静态电压稳定裕度计算方法。

上述文献对于静态电压稳定分析的研究对象更偏向于陆地无穷大电力系统或新能源孤岛微电网,针对海上平台电力系统静态电压稳定性的研究较少。相较于陆上电力系统,海上平台电力系统各透平发电机容量小,且差距不大,导致基于连续潮流的静态电压稳定分析无法选取一个大电源作为平衡节点,而是依靠系统全机组作为多平衡节点动态匹配的负荷。另外,海上平台电力系统的有功、无功功率平衡由透平机组承担,且用于生产的旋转负荷对其接入点电压有要求,因此,静态电压稳定分析应同时考虑机组有功、无功出力约束和旋转负荷电压约束。针对以上特征,本文基于透平发电机组和旋转负荷群的源-荷特性,建立计及源-荷功率动态匹配特性的扩展连续潮流模型,重新推导出扩展连续潮流方程的增广雅可比矩阵,并基于透平机组出力和节点电压限值确立静态电压稳定分析边界约束,提出基于牛顿-拉夫逊NR(Newton-Raphson)法的静态电压稳定分析方法。

1 海上平台电力系统源-荷模型

海上平台透平发电机组出力和旋转负荷群消耗功率随着运行电压和频率的改变而变化,且旋转负荷群功率同时受转差率的影响。为建立海上平台电

收稿日期:2020-05-23;修回日期:2020-12-17

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFB0904800)

Project supported by the National Key Research and Development Program of China(2018YFB0904800)

力系统源-荷模型,除节点电压幅值和相位外,引入系统频率和转差率作为新的状态变量。

1.1 透平发电机组模型

海上平台电力系统中负荷投切引起的系统功率不平衡由透平发电机组和旋转负荷群进行动态功率匹配,并稳定于新的运行点。传统的将机组电压和有功出力预先设定的方法不再适用,海上平台透平发电机组采用下垂控制方法^[15],各机组输出功率按下垂特性进行调节,其中,机组有功功率以其出力下限和系统频率上限为约束,机组无功功率以其出力下限和该点电压上限为约束,因此,某透平发电机组出力特性方程为:

$$\begin{cases} P_{Gi} = \sum_{k=1}^{N_{Gi}} [P_{Gsi}^k - K_{Pi}^k (f - \bar{f})] \\ Q_{Gi} = \sum_{k=1}^{N_{Gi}} [Q_{Gsi}^k - K_{Qi}^k (U_i - \bar{U})] \end{cases} \quad (1)$$

其中, P_{Gi} 、 Q_{Gi} 分别为节点*i*机组有功、无功出力; N_{Gi} 为节点*i*机组开机台数; P_{Gsi}^k 、 Q_{Gsi}^k 分别为节点*i*机组的第*k*台发电机有功、无功出力下限; K_{Pi}^k 、 K_{Qi}^k 分别为节点*i*机组的第*k*台发电机有功、无功下垂系数; f 、 U_i 分别为系统频率、节点*i*机组电压幅值; \bar{f} 、 \bar{U} 分别为系统频率和节点*i*机组电压幅值上限。

1.2 旋转负荷模型

海上平台电力系统的电力负荷包括用于油气生产、集输的旋转负荷群和生活辅助用电的恒功率负荷,其中旋转负荷群由感应电动机拖动。感应电动机的阻抗参数是转差率的函数,由感应电动机T型等值电路可得到感应电动机等值阻抗^[16]为:

$$Z_{\text{eq}}(s_i) = \frac{a_i b_i + c_i d_i}{a_i^2 + c_i^2} + j \frac{a_i d_i - b_i c_i}{a_i^2 + c_i^2} \quad (2)$$

其中, s_i 为节点*i*感应电动机转差率;所设参变量 a_i 、 b_i 、 c_i 、 d_i 的表达式见附录A式(A1)。

根据 $P'_i + jQ'_i = U_i^2 / \hat{Z}_i$,可得到旋转负荷的功率如式(3)所示。其中, P'_i 、 Q'_i 分别为节点*i*旋转负荷的有功功率、无功功率; \hat{Z}_i 为节点*i*感应电动机等值阻抗的共轭。

$$\begin{cases} P'_i = \frac{U_i^2 (a_i b_i + c_i d_i) (a_i^2 + c_i^2)}{(a_i b_i + c_i d_i)^2 + (b_i c_i - a_i d_i)^2} \\ Q'_i = \frac{U_i^2 (a_i d_i - b_i c_i) (a_i^2 + c_i^2)}{(a_i b_i + c_i d_i)^2 + (b_i c_i - a_i d_i)^2} \end{cases} \quad (3)$$

由感应电动机的机电暂态模型,可得到其稳态运行条件对应的转矩平衡方程^[17]为:

$$T_{Ai}(s_i) T_{Bi}(s_i) - T_{Ci}(U_i, f, s_i) = 0 \quad (4)$$

其中,参变量 $T_{Ai}(s_i)$ 、 $T_{Bi}(s_i)$ 、 $T_{Ci}(U_i, f, s_i)$ 的表达式见附录A式(A2)。

海上平台电力生产负荷为旋转负荷群,考虑到实际生产流程,将用于采油、注水、运输的旋转负荷等效为一个负荷群,则总旋转负荷为负荷群的叠加;通常将其他生产辅助和生活用电负荷视为恒功率负荷。因此,由旋转负荷和恒功率负荷组成的节点等效负荷功率为:

$$\begin{cases} P_{Li0} = N_{\text{eqi}} P'_i + P_{si} \\ Q_{Li0} = N_{\text{eqi}} Q'_i + Q_{si} \end{cases} \quad (5)$$

其中, P_{Li0} 、 Q_{Li0} 分别为节点*i*等效负荷的有功功率和无功功率; N_{eqi} 为节点*i*初始等效负荷群数量; P_{si} 、 Q_{si} 分别为节点*i*恒功率负荷的有功功率和无功功率。式中, P'_i 、 Q'_i 按式(3)的计算结果代入,若节点*i*无旋转负荷接入则均取为0。

2 静态电压稳定分析模型

2.1 扩展连续潮流方程

相较于传统陆地电力系统基于定步长的负荷增加,海上平台电力负荷增加应遵循采、注、输一体化的生产流程,即负荷增加方式为等效负荷群的叠加,故对负荷功率方程式(5)进行修正:

$$\begin{cases} P_{Li} = (N_{\text{eqi}} + \lambda_i) P'_i + P_{si} \\ Q_{Li} = (N_{\text{eqi}} + \lambda_i) Q'_i + Q_{si} \end{cases} \quad (6)$$

其中, P_{Li} 、 Q_{Li} 分别为修正后节点*i*负荷的有功功率和无功功率; λ_i 为节点*i*负荷增长因子,即等效负荷群叠加的数量,为自然数。

当海上平台电力负荷增加时,各透平机组出力和负荷功率均发生变化,系统通过源-荷功率动态匹配达到新的稳定运行点。对于海上平台电力系统,计及源-荷功率动态匹配特性,根据节点功率平衡方程和旋转负荷的转矩平衡方程,建立扩展连续潮流方程为:

$$\begin{cases} \Delta P_i = P_{Gi} - P_{Li} - U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \\ \Delta Q_i = Q_{Gi} - Q_{Li} - U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \\ \Delta T_i = T_{Ai} T_{Bi} - T_{Ci} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

其中, n 为系统节点数; G_{ij} 、 B_{ij} 分别为节点*i*、*j*对应的导纳矩阵的实部和虚部; $\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$ 为节点*i*、*j*电压的相位差。

扩展连续潮流方程中,节点注入有功功率平衡方程是关于电压、相角、频率、转差率和负荷增长因子的非线性方程;节点注入无功功率平衡方程是关于电压、相角、转差率和负荷增长因子的非线性方程;转矩平衡方程是关于电压、频率和转差率的非线性方程。与传统陆地电力系统动态潮流计算相比,虽然都考虑了频率计算,但本文所提连续潮流模型基于负荷单方向增加的静态电压稳定分析,本质上

是对系统功率平衡下的稳态进行计算,不涉及具体变化过程,而动态潮流通过计算系统有功功率不平衡时的稳态潮流,注重机组有功出力的再调度和系统频率变化,具有较强的实时性^[18]。

将包含节点注入功率平衡方程和转矩平衡方程的扩展连续潮流方程式(7)简记为:

$$\mathbf{F}(\mathbf{X}, \lambda) = 0 \quad (8)$$

其中, $\mathbf{X} = [\mathbf{U} \ \boldsymbol{\theta} \ f \ \mathbf{s}]^T$ 为待求增广状态变量列向量, λ 为负荷增长因子, $\mathbf{U} = [U_1 \ U_2 \ \dots \ U_n]^T$ 为节点电压幅值列向量, $\boldsymbol{\theta} = [\theta_1 \ \theta_2 \ \dots \ \theta_{n-1}]^T$ 为节点电压相位列向量,选择 θ_n 为系统的参考相位, $\mathbf{s} = [s_1 \ s_2 \ \dots \ s_{n_L}]^T$ 为接有旋转负荷群的节点感应电动机转差率列向量, n_L 为接有旋转负荷的节点数。

2.2 静态电压稳定分析的边界约束

海上平台电力系统的透平发电机组数量和容量有限,当负荷增加时,为满足系统平衡需求,通过源-荷功率动态匹配,各机组出力随之增加。在静态电压稳定分析的过程中,为保证源-荷功率动态匹配模型的解有实际意义,负荷增加时发电机组出力和各节点电压应满足以下约束条件。

(1) 各机组有功、无功出力均满足上下限约束:

$$\begin{cases} P_{Gsg} \leq P_{Gg}^{\lambda_i} \leq P_{Gmg} \\ Q_{Gsg} \leq Q_{Gg}^{\lambda_i} \leq Q_{Gmg} \end{cases} \quad (9)$$

(2) 负荷增加时各节点的电压幅值应不低于高压电机欠压保护定值,本文取为 0.6 p.u.。

$$U_i \geq 0.6 \text{ p.u.} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

其中, $P_{Gg}^{\lambda_i}$ 、 $Q_{Gg}^{\lambda_i}$ 分别为对应负荷节点 i 增长因子 λ_i 下的电源节点 g 机组有功、无功出力; P_{Gsg} 、 Q_{Gsg} 分别为电源节点 g 机组有功、无功出力下限; P_{Gmg} 、 Q_{Gmg} 分别为电源节点 g 机组有功、无功出力上限。

3 基于牛顿-拉夫逊法的静态电压稳定分析方法

针对海上平台小容量电力系统,在满足各机组出力约束和节点电压约束的前提下,通过源-荷功率动态匹配研究静态电压稳定的负荷极限,其关键是如何求解满足约束的扩展潮流方程。

通过循环给定负荷递增因子,针对每次的负荷递增,应用牛顿-拉夫逊法求解扩展连续潮流方程,根据源-荷功率动态匹配结果,校验各透平机组的出力、节点电压是否满足约束。

3.1 基于牛顿-拉夫逊法的扩展连续潮流模型求解

基于牛顿-拉夫逊法可以得到扩展连续潮流方程式(8)的修正量方程为:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta T \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} J_{PV} & J_{P\theta} & J_{Pf} & J_{Ps} \\ J_{QV} & J_{Q\theta} & J_{Qf} & J_{Qs} \\ J_{TV} & J_{T\theta} & J_{Tf} & J_{Ts} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U \\ \Delta \theta \\ \Delta f \\ \Delta s \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中, $\Delta P = [\Delta P_1 \ \Delta P_2 \ \dots \ \Delta P_n]^T$ 为节点注入有功功率不平衡量列向量; $\Delta Q = [\Delta Q_1 \ \Delta Q_2 \ \dots \ \Delta Q_n]^T$ 为节点注入无功功率不平衡量列向量; $\Delta T = [\Delta T_1 \ \Delta T_2 \ \dots \ \Delta T_{n_L}]^T$ 为转矩不平衡量列向量; 雅可比矩阵的物理定义与传统雅可比矩阵一致, J_{PV} 为 $n \times n$ 维矩阵, $J_{P\theta}$ 为 $n \times (n-1)$ 维矩阵, J_{Pf} 为 $n \times 1$ 维矩阵, J_{Ps} 为 $n \times n_L$ 维矩阵, J_{QV} 为 $n \times n$ 维矩阵, $J_{Q\theta}$ 为 $n \times (n-1)$ 维矩阵, J_{Qf} 为 $n \times 1$ 维矩阵, J_{Qs} 为 $n \times n_L$ 维矩阵, J_{TV} 为 $n_L \times n$ 维矩阵, $J_{T\theta}$ 为 $n_L \times (n-1)$ 维矩阵, J_{Tf} 为 $n_L \times 1$ 维矩阵, J_{Ts} 为 $n_L \times n_L$ 维矩阵; $\Delta U = [\Delta U_1 \ \Delta U_2 \ \dots \ \Delta U_n]^T$ 为节点电压增量列向量; $\Delta \theta = [\Delta \theta_1 \ \Delta \theta_2 \ \dots \ \Delta \theta_{n-1}]^T$ 为节点电压相位增量列向量; Δf 为系统频率增量; $\Delta s = [\Delta s_1 \ \Delta s_2 \ \dots \ \Delta s_{n_L}]^T$ 为节点感应电动机转差率列向量。

由于考虑源-荷功率动态匹配的作用,修正量方程的雅可比矩阵增广了新的子矩阵块,各子矩阵元素需重新推导。其中,传统子矩阵块 J_{PV} 、 $J_{P\theta}$ 、 J_{QV} 、 $J_{Q\theta}$ 存在不同的非零对角线元素,相应矩阵元素计算表达式分别为:

$$J_{PV_i} = \frac{\partial \Delta P_i}{\partial U_i} = \frac{2U_i(N_{eqi} + \lambda_i)(a_i b_i + c_i d_i)(a_i^2 + c_i^2)}{-(a_i b_i + c_i d_i)^2 - (b_i c_i - a_i d_i)^2} - \sum_{j=1, j \neq i}^n U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) - 2U_i G_{ii} \quad (12)$$

$$J_{P\theta_i} = \frac{\partial \Delta P_i}{\partial \theta_i} = U_i \sum_{j=1, j \neq i}^n U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (13)$$

$$J_{QV_i} = \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial U_i} = - \frac{2U_i(N_{eqi} + \lambda_i)(a_i d_i - c_i b_i)(a_i^2 + c_i^2)}{(a_i b_i + c_i d_i)^2 + (b_i c_i - a_i d_i)^2} - \sum_{k=1}^{N_G} K_{Qi}^k - \sum_{j=1, j \neq i}^n U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) + 2U_i B_{ii} \quad (14)$$

$$J_{Q\theta_i} = \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial \theta_i} = -U_i \sum_{j=1, j \neq i}^n U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (15)$$

其中, G_{ii} 、 B_{ii} 分别为 $i=j$ 时对应导纳矩阵的实部和虚部。若节点 i 无发电机组,则与 K_{Qi}^k 相关的项等于 0; 若节点 i 无旋转负荷群,则 $\partial \Delta P_i / \partial U_i$ 、 $\partial \Delta Q_i / \partial U_i$ 表达式中与参变量 a_i 、 b_i 、 c_i 、 d_i 相关的项为 0。

与系统频率耦合的子矩阵均为列矩阵,除 J_{Qf} 为零矩阵外, J_{Pf} 、 J_{Tf} 的元素表达式分别为:

$$J_{Pf_i} = \frac{\partial \Delta P_i}{\partial f} = - \sum_{k=1}^{N_G} K_{Pi}^k \quad (16)$$

$$J_{T_i} = \frac{\partial \Delta T_i}{\partial f} = \frac{p T_i' (X_i'' - X_i') U_i^2}{2\pi k_m f^2} \quad (17)$$

其中, p 为极对数; T_i' 为节点 i 定子开路暂态时间常数; X_i'' 、 X_i' 分别为节点 i 稳态电抗和暂态电抗; k_m 为负载系数。若节点 i 无发电机组, 则 $\partial \Delta P_i / \partial f$ 取为 0; 若节点 i 无旋转负荷群, 则 $\partial \Delta T_i / \partial f$ 不存在。

与转差率和转矩不平衡量相耦合的子矩阵中, 除 J_{T_0} 为零矩阵外, J_{P_s} 、 J_{Q_s} 、 J_{T_u} 、 J_{T_s} 中只有接有旋转负荷群节点的功率和转矩不平衡量对该节点转差率和电压的偏导才不为 0, 其元素表达式分别为:

$$J_{P_{si}} = \frac{\partial \Delta P_i}{\partial s_i} = \frac{(N_{eqi} + \lambda_i)(a_i' + b_i' + c_i') U_i^2}{(a_i^2 b_i^2 + c_i^2 d_i^2 + b_i^2 c_i^2 + a_i^2 d_i^2)^2} \quad (18)$$

$$J_{Q_{si}} = \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial s_i} = \frac{(N_{eqi} + \lambda_i)(d_i' + e_i' + h_i') U_i^2}{(a_i^2 b_i^2 + c_i^2 d_i^2 + b_i^2 c_i^2 + a_i^2 d_i^2)^2} \quad (19)$$

$$J_{T_{ui}} = \frac{\partial \Delta T_i}{\partial U_i} = -U_i \frac{p T_i' s_i (X_i'' - X_i')}{\pi k_m f} \quad (20)$$

$$J_{T_{si}} = \frac{\partial \Delta T_i}{\partial s_i} = \left[2s_i (X_i')^2 (T_i')^2 - 2R_{si} X_i' T_i' + 2s_i R_{si}^2 (T_i')^2 + 2X_i R_{si} T_i' \right] \left[\alpha + (1-\alpha)(1-s_i)^\rho \right] + \rho \left[(R_{si} - s_i X_i' T_i')^2 + (X_i'' + s_i R_{si} T_i')^2 \right] \times (\alpha - 1)(1-s_i)^{\rho-1} - \frac{p T_i' (X_i'' - X_i') U_i^2}{2\pi k_m f} \quad (21)$$

其中, 参变量 a_i' 、 b_i' 、 c_i' 、 d_i' 、 e_i' 、 h_i' 的表达式见附录 A 式 (A3) 和式 (A4); R_{si} 为节点 i 感应电动机定子绕组的电阻; α 为机械负载中与转速无关部分所占比例; ρ 为负载指数。

基于上述各偏导子矩阵, 其源-荷功率动态匹配的核心是在给定源荷参数、各状态变量和负荷增长因子初值、负荷增加方式的条件下, 应用牛顿-拉夫逊法求解修正方程式 (11) 以获得节点电压幅值和相位、系统频率以及转差率的修正量, 并对状态变量进行更新修正, 反复迭代直至满足式 (22) 所示收敛条件。

$$\max |\Delta P \ \Delta Q \ \Delta T| < \varepsilon \quad (22)$$

其中, ε 为收敛精度。

3.2 静态电压稳定性分析步骤

由连续潮流方程和静态电压稳定分析边界约束构成的系统静态电压稳定分析模型, 针对系统所有接有负荷的节点 (以下统称为负荷节点) 进行静态电压稳定分析的步骤如下。

(1) 输入海上平台电力系统线路、透平机组、负荷的参数; 设置收敛精度 ε 、最大迭代次数 N_{\max} 、各发电机组有功和无功出力上下限。

(2) 选择负荷增加节点 i , 初始化增广状态变量 $X^0 = [U^0 \ \theta^0 \ f^0 \ s^0]^T$ 、负荷增长因子 λ_{0i} , 令 $\lambda_i = \lambda_{0i}$ 。

(3) 由式 (7) 计算节点注入功率和转矩的不平衡

量列向量 ΔF^{λ_i} , 应用式 (12)~(21) 所示子矩阵计算公式得到雅可比矩阵 J^{λ_i} 。

(4) 采用牛顿-拉夫逊法迭代求解式 (11), 若迭代次数不超过预设最大迭代次数且满足收敛条件式 (22), 得到增广状态变量 $X = [U \ \theta \ f \ s]^T$; 若迭代次数大于预设最大迭代次数, 对应负荷增长因子很难实现源-荷功率动态匹配, 转向步骤 (7)。

(5) 应用源-荷功率方程式 (1) 和式 (6) 计算各机组出力 $P_G^{\lambda_i}$ 、 $Q_G^{\lambda_i}$ 和负荷功率 $P_L^{\lambda_i}$ 、 $Q_L^{\lambda_i}$ 。

(6) 对各机组有功和无功出力以及节点电压进行约束校验。若同时满足约束条件式 (9) 和式 (10), 则 $\lambda_i = \lambda_i + 1$, 转至步骤 (3); 否则, 转至步骤 (7)。

(7) 节点 i 负荷增加至极限, 输出最大负荷增长因子 $\lambda_{Mi} = \lambda_i - 1$, 计算该节点负荷增加极限 $\Delta P_{L_{mi}} = P_{Li}^{\lambda_{Mi}} - P_{Li}^{\lambda_{0i}}$ 。

(8) 若已完成所有负荷节点的极限负荷分析, 找出系统薄弱节点; 若未完成, 转至步骤 (2)。

基于牛顿-拉夫逊法的海上平台电力系统静态电压稳定分析流程图见附录 B 图 B1。

4 算例分析

某海上平台 19 节点电力系统拓扑结构图见附录 B 图 B2。接有发电机的节点为节点 17—19, 配有相同型号的透平发电机组, 相应的发电机数量分别为 1、2、4 台, 其参数见附录 B 表 B1; 负荷节点为节点 5、12—19, 其中初始等效负荷群数量与恒功率负荷参数见附录 B 表 B2, 拖动旋转负荷群的感应电动机参数见附录 B 表 B3。

系统基准容量取为 100 MW, 基准频率为 50 Hz, 令节点 19 的电压相位为系统参考相位, 设置初始负荷增长因子 $\lambda = 0$, 收敛精度 $\varepsilon = 10^{-5}$, 最大迭代次数 $N_{\max} = 100$ 。

4.1 静态电压稳定分析结果

将附录 B 图 B2 的负荷节点分别增加负荷, 应用本文提出的静态电压稳定分析方法得到各节点的负荷增加极限和临界电压, 如表 1 所示 (表中电压幅值为标幺值)。

由表 1 可知, 各负荷允许的最大负荷增长因子不同, 对应的负荷增加极限和电压临界值也不同。其中, 节点 16 在其负荷增加过程中负荷增加极限最小, 但电压幅值下降程度最大, 该节点为系统薄弱节点。在该薄弱节点负荷增加时, 分析各负荷节点电压、各机组出力、系统频率的变化情况。

(1) 节点电压随薄弱节点负荷增加的变化趋势。

随着薄弱节点负荷增加, 薄弱节点的电压随负荷增加的变化图见附录 B 图 B3, 其他各负荷节点的电压幅值见附录 B 表 B4。

由图 B3 知, 薄弱节点初始负荷功率为 3.903 MW,

表1 各负荷节点负荷增加极限与电压
Table 1 Load increasing limit and voltage of each load node

节点	最大负荷 增长因子	初始负荷 功率/MW	负荷增加 极限/MW	电压幅值	
				临界值	初始值
5	10	1.135	5.056	0.9226	1.0196
12	10	8.713	5.048	0.9323	0.9951
13	10	8.210	5.034	0.9064	0.9798
14	10	5.683	5.033	0.8969	0.9844
15	10	9.022	4.991	0.8717	0.9687
16	9	3.903	4.517	0.8582	0.9744
17	10	6.195	5.083	1.0081	1.0223
18	11	16.656	5.584	1.0132	1.0220
19	11	10.131	5.597	1.0301	1.0348

满足静态电压稳定分析边界约束下的极限负荷功率为8.417 MW,临界电压幅值为0.8582 p.u.。

由表B4可知,除薄弱节点16外,其他负荷节点电压均随着薄弱节点负荷增加呈现不同的下降幅度,其中距离薄弱节点电气距离最近的节点15电压下降幅度最大。

(2)机组出力和系统频率随薄弱节点负荷增加的变化趋势。

各透平发电机组有功、无功出力随薄弱节点负荷增加的变化如图1所示,系统频率随薄弱节点负荷增加的特性图见附录B图B4。

由图1可知,各透平发电机组有功、无功出力均随着薄弱节点负荷的增加而增加,其中节点17、18机组有功出力均逼近其上限(有功出力上限分别为11、22 MW),节点19机组有功、无功出力增加幅度最大,这是由于在单台透平机下垂系数相等的情况下,节点19开机数量最多,承担的负荷份额最大。由图B4可知,随着薄弱节点负荷的增加,系统频率降低,其中对应薄弱节点负荷增加极限的系统频率

表2 基于薄弱节点负荷增加的静态电压稳定分析结果

Table 2 Results of static voltage stability analysis based on weak bus load increasing

方法	最大负荷 增长因子	负荷功率/MW	薄弱节点 临界电压	机组出力/(MV·A)			系统频率/Hz
				节点17	节点18	节点19	
本文方法	9	8.417	0.8582	10.758+j5.836	21.846+j11.662	43.032+j18.125	49.907
传统方法	18	13.103	0.5784	10+j5.773	20+j11.517	53.174+j36.356	50.000

由图2可知,本文方法得到的薄弱节点临界电压均比传统方法的高,这是由于在计及源-荷功率动态匹配时,节点电压不仅随负荷的增加而下降,且同时受到透平机组出力调节的影响。本文方法由于考虑节点电压和机组出力的约束,限制了负荷增加,使得其临界电压远大于传统方法。

由表2可知,本文方法由于考虑源-荷功率动态匹配特性,各透平发电机组出力分布与传统方法也不同,其特点为共同承担负荷的增加,且同时满足有功、无功出力上限的约束。而采用传统方法时,指定系统频率保持恒定,节点19机组作为唯一平衡节点

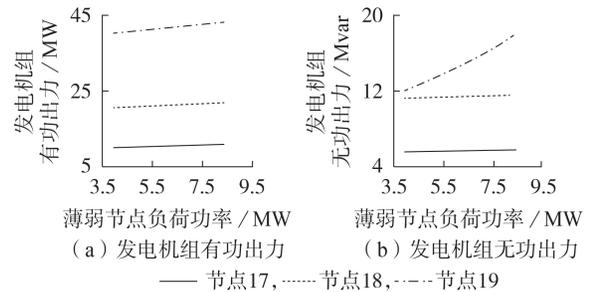


图1 负荷增加时各机组出力曲线图

Fig.1 Output curves of each generator when load increases

为49.907 Hz。

4.2 静态电压稳定分析对比

传统静态电压稳定分析方法不考虑边界约束,若负荷增加时机组无功出力越限,则将PV节点转换为PQ节点且不计及源-荷功率动态匹配特性,设节点19为平衡节点,节点17、18为PV节点,其他节点为PQ节点。对比本文方法与传统方法的静态电压稳定分析结果,其中薄弱节点电压随负荷的变化如图2所示(图中薄弱节点电压为标么值),临界点各项数据如表2所示(表中薄弱节点临界电压为标么值)。

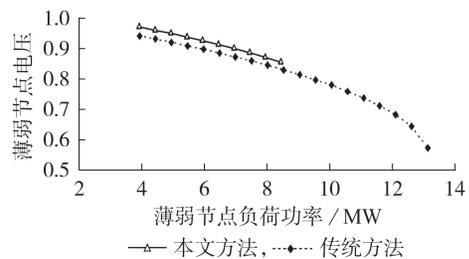


图2 负荷增加时节点电压曲线对比图

Fig.2 Comparison of node voltage curves when load increases

承担系统负荷增加的全部功率缺额,其有功、无功出力均发生越限(分别超过其上限44 MW、36 Mvar),且临界电压也不满足高压电机欠压保护定则,不符合海上平台电力系统实际运行状况。

5 结论

针对海上平台小容量电力系统的源-荷特征,建立计及源-荷功率动态匹配特性和边界约束的静态电压稳定分析模型,提出基于牛顿-拉夫逊法的静态电压稳定分析方法,可以得出以下结论。

(1)将系统功率缺额由多平衡节点承担的思想

引入连续潮流模型,在给出薄弱节点负荷增加极限和临界电压的同时,也能够得到各机组出力和系统频率随负荷增加的变化。

(2)与传统牛顿-拉夫逊法相比,本文方法基于源-荷功率动态匹配和静态电压稳定分析边界约束。一方面限制了负荷增加,满足机组有功、无功出力约束,保证了节点电压大于高压电机欠压保护定值;另一方面参与系统功率平衡的透平机组不唯一,各机组共同承担负荷增加引起的功率缺额,符合海上平台电力系统实际运行情况。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 李雪,张安安,敬佳佳,等. 海上平台电力系统研究综述[J]. 电网与清洁能源,2016,32(2):1-7.
LI Xue,ZHANG An'an,JING Jiajia, et al. Overview of offshore electric systems[J]. Power System and Clean Energy, 2016,32(2):1-7.
- [2] 英莹. 海上石油平台电力系统保护的配置与研究[D]. 天津:天津大学,2007.
YING Ying. Layout and research on the protection of power system of marine petroleum platform[D]. Tianjin:Tianjin University,2007.
- [3] SONG Y,Hill D J,LIU T. Static voltage stability analysis of distribution systems based on network-load admittance ratio [J]. IEEE Transactions on Power Systems,2019,34(3):2270-2280.
- [4] 马瑞,秦佳倩. 含DFIG风电场电-气耦合系统的概率连续混合潮流方法及其负荷裕度分析[J]. 电力自动化设备,2019,39(8):38-46.
MA Rui,QIN Jiaqian. Probabilistic continuous hybrid flow method for electricity-gas coupling system integrated with DFIG wind farm and its load margin analysis[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(8):38-46.
- [5] 郑浩,赵晋泉,杨乘胜,等. 节点约束统一的互补潮流模型及其应用[J]. 电力自动化设备,2016,36(2):124-128,135.
ZHENG Hao,ZHAO Jinquan,YANG Chengsheng, et al. Complementary power flow model with unified bus constraints and its application[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016,36(2):124-128,135.
- [6] 彭寒梅,曹一家,黄小庆,等. 无平衡节点孤岛运行微电网的连续潮流计算[J]. 中国电机工程学报,2016,36(8):2057-2067.
PENG Hanmei,CAO Yijia,HUANG Xiaoqing, et al. Continuous power flow for islanding microgrid without balance nodes[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(8):2057-2067.
- [7] 伍利,南海鹏,姚李孝. 考虑功频静特性及发电机出力分配的静态电压稳定分析[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(14):26-30.
WU Li,NAN Haipeng,YAO Lixiao. Static voltage stability analysis considering static power frequency characteristics of load and generation dispatch[J]. Power System Protection and Control,2012,40(14):26-30.
- [8] 鲍海波,郭小璇. 考虑新能源发电不确定性的静态电压稳定故障筛选与排序方法[J]. 电力自动化设备,2019,39(7):57-63.
BAO Haibo,GUO Xiaoxuan. Fault screening and ranking method of static voltage stability considering uncertainty of renewable energy power generation[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(7):57-63.
- [9] 李国强,刘光晔,侯龙宇,等. 多OLTC协调动作对电压稳定影响的定量评估方法[J]. 电力自动化设备,2019,39(7):154-160.
LI Guoqiang,LIU Guangye,HOU Longyu, et al. Quantitative evaluation method of voltage stability affected by multi-OLTC coordination[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(7):154-160.
- [10] 潘忠美,刘健,石梦,等. 计及电压/频率静特性的孤岛微电网电压稳定性与薄弱节点分析[J]. 电网技术,2017,41(7):2214-2221.
PAN Zhongmei,LIU Jian,SHI Meng, et al. Static voltage stability and weak bus analysis of islanded microgrids considering static voltage/frequency characteristics[J]. Power System Technology,2017,41(7):2214-2221.
- [11] 初壮,孙陶然,雷振伍,等. 考虑带泵类负载感应电动机影响的静态电压稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(1):51-58.
CHU Zhuang,SUN Taoran,LEI Zhenwu, et al. Static voltage stability analysis considering the influence of pump loads induction motor[J]. Power System Protection and Control,2019,47(1):51-58.
- [12] 伍利,古婷婷,姚李孝. 基于改进连续潮流法的静态电压稳定分析[J]. 电网技术,2011,35(10):99-103.
WU Li,GU Tingting,YAO Lixiao. Static voltage stability analysis based on improved continuation power flow[J]. Power System Technology,2011,35(10):99-103.
- [13] 宋越,程浩忠,张健,等. 基于电压控制分区的发电机无功备用优化方法[J]. 电力系统自动化,2015,39(4):33-39,51.
SONG Yue,CHENG Haozhong,ZHANG Jian, et al. A generator reactive power reserve optimization method based on voltage control areas[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015,39(4):33-39,51.
- [14] 张谦,郑惠萍,王金浩,等. 基于AQ节点的电力系统静态电压稳定裕度计算方法[J]. 电网技术,2019,43(2):714-721.
ZHANG Qian,ZHENG Huiping,WANG Jinhao, et al. A method for calculating static voltage stability margin of power system based on AQ bus[J]. Power System Technology,2019,43(2):714-721.
- [15] RESE L,COSTA A S,SILVA A S E. A modified load flow algorithm for microgrids operating in islanded mode[C]//2013 IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies. Sao Paulo,USA:IEEE,2013:1-7.
- [16] 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,2002:83-87.
- [17] WANG Y S,LU Z Q,LI Q. Nonlinear power flow calculation of offshore oilfield power grid based on improved PSO algorithm [C]//2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia. Chengdu,China:IEEE,2019:3947-3952.
- [18] 孙辰,刘东,李庆生. 信息物理融合的主动配电网动态潮流研究[J]. 中国电机工程学报,2016,36(6):1509-1516.
SUN Chen,LIU Dong,LI Qingsheng. Research on dynamic power flow of active distribution network based on cyber-physical fusion[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(6):1509-1516.

作者简介:



王艳松

王艳松(1965—),女,山东蓬莱人,教授,博士,主要研究方向为电力系统运行与控制、电力负荷预测、电能质量分析与谐波治理等(E-mail:wys91517@163.com)。

宣德之(1996—),男,河南南阳人,硕士研究生,通信作者,研究方向为电力系统静态稳定性分析(E-mail:xdz928676576@163.com)。

(编辑 王锦秀)

Static voltage stability analysis of offshore platform power system based on source-load power dynamic matching

WANG Yansong¹, XUAN Dezhi¹, LI Qiang²

(1. College of New Energy, China University of Petroleum(East China), Qingdao 266580, China;

2. CNOOC Ltd., Beijing 100027, China)

Abstract: The static voltage stability analysis of offshore platform power system is the premise to ensure its security and reliability. Aiming at the feature of multiple slack buses in offshore platform power system, an extended continuous power flow model is built based on the source-load characteristics of turbo-generator and rotating load group, which considers the source-load power dynamic matching characteristics. Aiming at small capacity characteristics of units in offshore platform power system and production requirement of rotating loads, the static voltage stability analysis boundary constraint is established based on the limits of unit output and bus voltage. The augmented Jacobian matrix of extended continuous power flow is deduced, and a static voltage stability analysis method based on Newton-Raphson method is proposed. The static voltage stability analysis results of an offshore platform power system show that, compared with the traditional Newton-Raphson method, the proposed method can not only find the voltage weak bus along with the load increase, but also give the output value of each unit adapting to the load increase.

Key words: static voltage stability; multiple slack buses; continuous power flow; source-load power dynamic matching; augmented Jacobian matrix

(上接第131页 continued from page 131)

Pilot protection of flexible DC grid considering active fault current limiting strategy

SONG Guobing¹, HOU Junjie¹, GUO Bing¹, WANG Ting¹, CHANG Zhongxue¹, SHEN Bing²

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. State Grid Shanghai Electric Power Research Institute, Shanghai 200437, China)

Abstract: In view of the problems of low reliability and sensitivity when the traditional DC protection principle is applied to flexible DC grid, the pilot protection of flexible DC grid considering active fault current limiting strategy of converter is proposed. The polarity characteristics of fault current in the capacitor discharge stage and active fault current limiting stage of converter are analyzed. Then the improved polarity sequence of fault current is constructed, and the current waveform identification method based on Spearman correlation coefficient is introduced to realize the fault area identification of flexible DC grid. The simulation results show that the proposed protection principle can identify the fault area of flexible DC grid in the capacitor discharge stage and active fault current limiting stage of converter, and has high reliability and sensitivity.

Key words: flexible DC grid; active fault current limiting strategy; correlation discrimination; DC protection; relay protection

附录 A:

$$\begin{cases} a_i = R_{ri}/s_i, b_i = R_{ri}R_{si}/s_i - X_{mi}X_{si} - X_{si}X_{ri} - X_{mi}X_{ri} \\ c_i = X_{mi} + X_{ri}, d_i = R_{ri}X_{si}/s_i + R_{ri}X_{mi}/s_i + R_{si}X_{mi} + R_{si}X_{ri} \end{cases} \quad (\text{A1})$$

其中, X_{si} 为节点 i 感应电动机定子绕组的电抗; R_{ri} 、 X_{ri} 分别为节点 i 转子绕组的电阻和电抗; X_{mi} 为节点 i 激磁电抗。

$$\begin{cases} T_{Ai}(s_i) = (R_{si} - s_i X_i' T_i')^2 + (X_i'' + s_i R_{si} T_i')^2 \\ T_{Bi}(s_i) = \alpha + (1 - \alpha)(1 - s_i)^\rho, T_i' = (X_{ri} + X_{mi})/R_{ri}, X_i'' = X_{si} + X_{mi} \\ T_{Ci}(U_i, f, s_i) = \frac{p T_i'(X_i'' - X_i') s_i U_i^2}{2\pi k_m f}, X_i' = X_{si} + \frac{X_{mi} X_{ri}}{X_{mi} + X_{ri}} \end{cases} \quad (\text{A2})$$

$$\begin{cases} a_i' = \frac{R_{ri}}{s_i^2} (a_i^4 b_i^3 + 2a_i^2 b_i c_i^2 d_i^2 + 2a_i^2 b_i^3 c_i^2 + a_i^4 b_i d_i^2 + b_i c_i^4 d_i^2 + b_i^3 c_i^4) \\ b_i' = \frac{R_{ri} R_{si}}{s_i^2} (-a_i^5 b_i^2 + 2a_i^3 c_i^2 d_i^2 + a_i^5 d_i^2 + a_i c_i^4 d_i^2 - a_i b_i^2 c_i^4 - 2a_i^4 b_i c_i d_i - 4a_i^2 b_i c_i^3 d_i - 2a_i^3 b_i^2 c_i^2 - 2b_i c_i^5 d_i) \\ c_i' = \frac{R_{ri} (X_{si} + X_{mi})}{s_i^2} (a_i^4 b_i^2 c_i - 2a_i^2 c_i^3 d_i^2 + 2a_i^2 b_i^2 c_i^3 - a_i^4 c_i d_i^2 - c_i^5 d_i^2 + b_i^2 c_i^5 - 4a_i^3 b_i c_i^2 d_i - 2a_i b_i c_i^4 d_i - 2a_i^5 b_i d_i) \end{cases} \quad (\text{A3})$$

$$\begin{cases} d_i' = \frac{R_{ri}}{s_i^2} (a_i^4 b_i^2 d_i + 2a_i^2 c_i^2 d_i^3 + 2a_i^2 b_i^2 c_i^2 d_i + a_i^4 d_i^3 + c_i^4 d_i^3 + b_i^2 c_i^4 d_i) \\ e_i' = \frac{R_{ri} R_{si}}{s_i^2} (a_i^4 b_i^2 c_i - 2a_i^2 c_i^3 d_i^2 + 2a_i^2 b_i^2 c_i^3 - a_i^4 c_i d_i^2 - c_i^5 d_i^2 + b_i^2 c_i^5 - 2a_i^5 b_i d_i - 4a_i^3 b_i c_i^2 d_i - 2a_i b_i c_i^4 d_i) \\ h_i' = \frac{R_{ri} (X_{si} + X_{mi})}{s_i^2} (a_i^5 b_i^2 - 2a_i^3 c_i^2 d_i^2 + 2a_i^3 b_i^2 c_i^2 - a_i^5 d_i^2 - a_i c_i^4 d_i^2 + a_i b_i^2 c_i^4 + 4a_i^2 b_i c_i^3 d_i + 2a_i^4 b_i c_i d_i + 2b_i c_i^5 d_i) \end{cases} \quad (\text{A4})$$

附录 B:

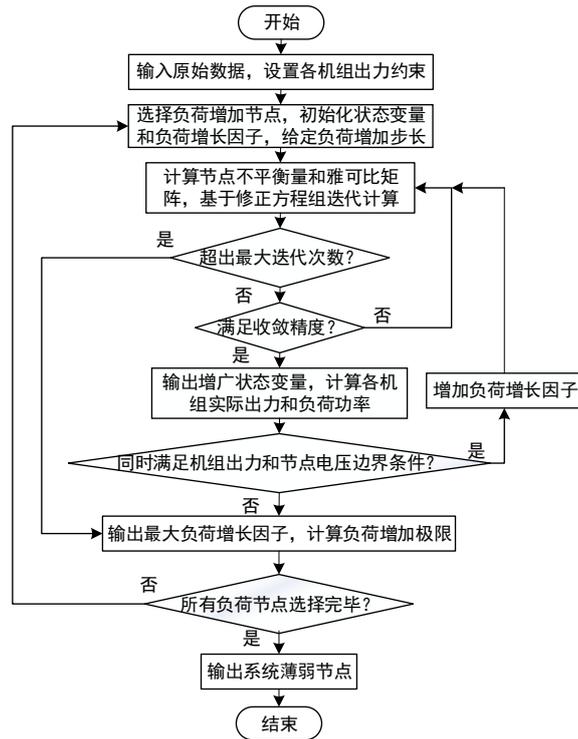


图 B1 基于牛顿-拉夫逊法的静态电压稳定分析流程图

Fig.B1 Flowchart of static voltage stability analysis based on NR method

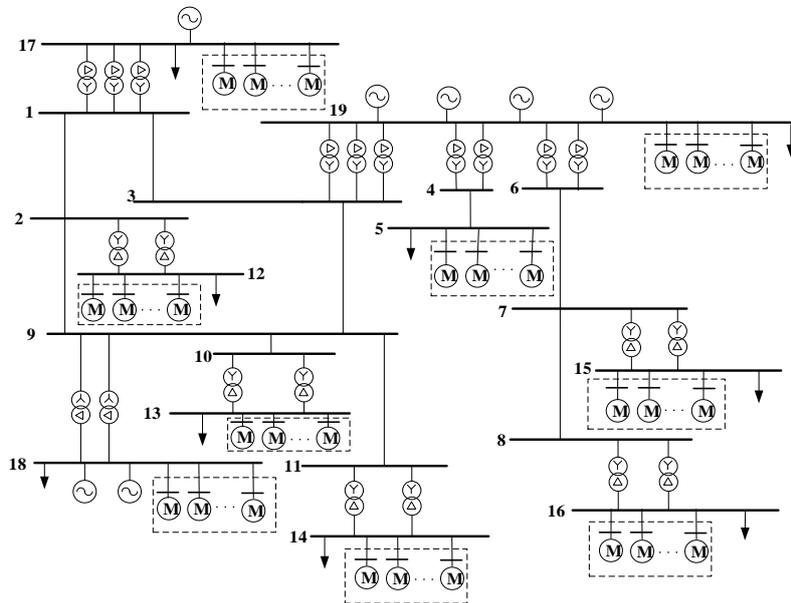


图 B2 某海上平台电力系统拓扑结构图

Fig.B2 Topology of an offshore platform power system

表 B1 透平发电机参数

Table B1 Parameters of turbo-generators

参数	数值
有功下限/MW	3.73
无功下限/Mvar	0
有功上限/MW	11
无功上限/Mvar	9
频率上限	1.004
电压上限	1.05
有功下垂系数	12
无功下垂系数	2

注：频率上限、电压上限、有功下垂系数、无功下垂系数为标么值。

表 B2 负荷节点参数

Table B2 Parameters of load bus

节点	初始负荷群数	恒功率负荷	
		有功功率/MW	无功功率/Mvar
5	1	0.626	0.352
12	6	5.661	1.297
13	6	5.161	1.915
14	4	3.65	1.694
15	10	3.943	0.024
16	2	2.887	0.518
17	6	3.138	0.651
18	24	4.430	0.057
19	12	4.013	0.092

表 B3 感应电动机参数

Table B3 Parameters of induction motors

参数	数值
定子绕组电阻	0.003 5
定子绕组电抗	0.123 4
转子绕组电阻	0.013 3
转子绕组电抗	0.123 4
激磁电抗	2.032 4
极对数	5
负载系数	0.83
机械负载中与转速无关比例	0.15
负载指数	2

注：电阻、电抗均为标么值。

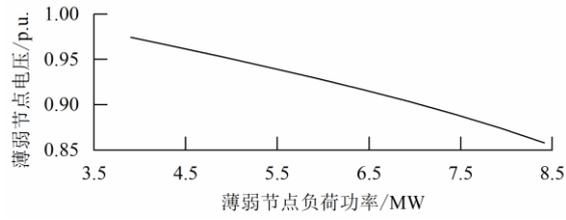


图 B3 负荷增加时薄弱节点电压曲线图

Fig.B3 Voltage curve of weak bus when load increases

表 B4 负荷增加时其他负荷节点电压

Table B4 Voltage of other load buses when load increases

节点	电压幅值		节点	电压幅值	
	临界值	初始值		临界值	初始值
5	1.012 1	1.019 6	15	0.904 6	0.968 7
12	0.991 6	0.995 1	17	1.020 8	1.022 3
13	0.975 7	0.979 8	18	1.020 8	1.022
14	0.980 4	0.984 4	19	1.027 3	1.034 8

注：电压幅值均为标么值。

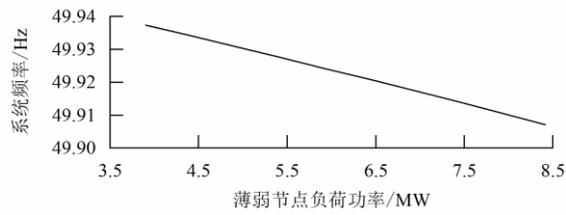


图 B4 负荷增加时系统频率曲线图

Fig.B4 System frequency curve when load increases