

多 OLTC 协调动作对电压稳定影响的定量评估方法

李国强,刘光晔,侯龙宇,金龙,杨亚乔

(湖南大学 电气与信息工程学院,湖南 长沙 410082)

摘要:为定量评估复杂系统中多台有载调压变压器(OLTC)调节对系统电压稳定的影响,根据非线性方程极值分析原理,推导出了网络传输功率极限的必要条件,提出可以评价负荷节点电压稳定性的法向阻抗模裕度指标(NIMMI)。基于法向动态等值阻抗模,提出了可以动态跟踪系统节点间联系紧密性程度的电气耦合系数指标。针对含 OLTC 的非线性电力系统特点,考虑变比的影响,在牛顿-拉夫逊法求解潮流方程组的基础上,对初始状态下使潮流计算收敛的雅可比矩阵进行修正,计算节点动态等值参数,并进一步提出了计及负荷特性和 OLTC 调压效应的 NIMMI。所提出的 NIMMI 能精确地量化分析复杂系统中多 OLTC 协调动作对电压稳定的综合影响,可以作为全网 OLTC 协调动作方案及变比调节范围的合理性评价依据。电气耦合系数指标能准确有效地识别出电压失稳速度较快的关键节点。最后,通过 IEEE 14 节点系统的仿真结果验证了分析方法的有效性和正确性。

关键词:电力系统;电压稳定;法向阻抗模裕度指标;有载调压变压器;动态等值

中图分类号:TM 761

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.07.023

0 引言

电压稳定性问题一直是电力系统运行和规划的主要关注点,针对电网规模扩大、负荷水平不断提高的现状,电力系统电压稳定性的有效分析与准确评估尤为重要。有载调压变压器 OLTC (On-Load Tap Changer) 作为保障电力系统电压水平的重要控制手段,在系统受到扰动或者故障导致电压水平降低时,调节分接头来重新分配系统中的无功功率以支撑电网电压^[1]。OLTC 的电压支撑作用与其在系统中的接入位置及负荷水平密切相关。但在重载时,OLTC 动作会出现导致电压失稳以及加速电压崩溃的现象^[2-3]。

针对 OLTC 调节对电压稳定的影响及其可能导致电压失稳和电压崩溃的问题,国内外学者做了大量的理论分析和仿真计算,并提供了一系列的研究方法^[4-6]。文献[7]根据简单电力系统不稳定平衡点的不稳定流形确定系统由 OLTC 动作引起的电压失稳方式,当系统不稳定平衡点的不稳定流形的方向沿着 OLTC 变比的变化方向时,如果系统的状态被该不稳定平衡点的不稳定流形所捕获,系统电压将会由于 OLTC 的调节作用而失去稳定。由于实际系统中的电压崩溃事故大多是非振荡形式的单调失稳^[8],因而静态电压稳定分析方法得到了广泛的应用。文献[9]通过建立并联电容器电抗与线路电抗及 OLTC 电抗的匹配关系,分析了 OLTC 对网络传输极限功率的影响。文献[10]利用分叉理论研究

OLTC 变比变化对电压失稳静分叉曲线的“迁移”问题,提出了对应于不同的负荷模型,分接头调节对电压稳定性的影响不同。文献[9,11]详细讨论了 OLTC 变比变化对临界功率及负荷功率的影响,根据网络传输极限功率与负荷功率的增长速度判定系统稳定性。

上述方法局限于分析分接头调节对负荷功率及临界功率的影响,单一地进行定性分析,只能判定分接头调整是否可能导致电压失稳,无法定量分析分接头动作对电压稳定性的影响程度。电压稳定性分析需要明确分析系统当前运行状态可能的变化趋势,以及运行点距离极限功率点的远近,快速准确地量化电力系统实时运行状态,便于对系统进行预防、紧急和校正控制做出及时判断^[12-13]。事实上,复杂系统中多台 OLTC 参与调压时,将综合影响系统节点的电压稳定性。以往将含 OLTC 的复杂网络等值为简单系统模型虽然便于分析,但不符合电力系统实际,忽略了电力系统是耦合的整体,所得结论在复杂系统中多 OLTC 以不同组合运行方式共同参与调压时未必适用。

本文应用非线性电力系统动态等值分析方法^[14],定量分析复杂系统中多台 OLTC 协调动作对系统电压稳定的影响。根据复杂系统 OLTC 实际组合运行方式,推导了相应评价指标的计算方法。提出可以评价节点电压稳定性的法向阻抗模裕度指标 NIMMI (Normal Impedance Modulus Margin Index),进一步定义可以动态跟踪节点间联系紧密程度的电气耦合系数指标,并根据其值的大小识别电压失稳速度较快的节点。分析 OLTC 的电压调节效应对电压稳定临界点的影响,并对 NIMMI 进行修正。最后,提出了计及负荷特性的 NIMMI 计算方法,对负荷特

收稿日期:2018-07-03;修回日期:2019-04-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51577053)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51577053)

性的影响进行理论分析和等值参数计算。通过 IEEE 14 节点系统仿真验证了分析方法的有效性和正确性。

1 动态等值分析原理

1.1 电压稳定的等值电路分析方法

从电力系统任一恒功率负荷节点看进去,将系统综合等效为非线性交流电路,如图 1(a)所示,进一步对系统进行等值,可将整个系统等值简化为图 1(b)所示的戴维南等效电路,被等值电力系统的非线性包含于等值参数中。图中, Z_{LD} 、 $P_{LD}+jQ_{LD}$ 分别为负荷阻抗及负荷功率; E_{THEV} 、 Z_{THEV} 分别为节点所对应的系统戴维南等值电势与戴维南等值阻抗。

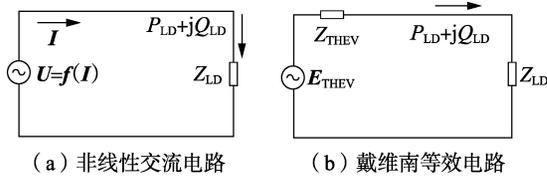


图 1 负荷节点的动态等值电路

Fig.1 Dynamic equivalent circuit in PQ node

图 1(a)中, I 为负荷电流, U 为节点电压, U 是 I 的非线性函数,负荷的静态等值阻抗模 $|Z_{LD}|$ 为:

$$|Z_{LD}| = \frac{U}{I} \quad (1)$$

其中, I 与 U 分别为电流模与电压模。

设负荷复功率为:

$$S_{LD} = P_{LD}(\lambda) + jQ_{LD}(\lambda) = UI^* \quad (2)$$

其中, λ 为负荷功率参变量。

将功率方程式(2)写成平方形式,即:

$$S_{LD}^2 = P_{LD}^2 + Q_{LD}^2 = U^2 I^2 \quad (3)$$

式(3)对 λ 求导,并令:

$$\frac{dP_{LD}^2}{d\lambda} + \frac{dQ_{LD}^2}{d\lambda} = 2UI^2 \left(\frac{dU}{dI} + \frac{U}{I} \right) \frac{dI}{d\lambda} = 0 \quad (4)$$

在负荷功率动态变化过程中,只有当 dU 与 dI 异号时,节点电压才有稳定问题;而当 dU 与 dI 同号时,节点电压没有稳定问题^[15]。

可定义系统的法向动态等值阻抗模为:

$$|Z_{NOR}| = -\frac{dU}{dI} = -\frac{dU/d\lambda}{dI/d\lambda} \quad (5)$$

这里的法向是极坐标下电压或电流相量微分的幅值增量方向。关于式(5)的计算方法,将在第2节给出。分析 OLTC 调压效应及负荷特性对电压稳定的影响时,网络传输功率极限点与雅可比矩阵奇点并不一致,因此要对雅可比矩阵进行修正。

由式(5)可知, $|Z_{NOR}|$ 的值仅与节点电压幅值和节点注入电流幅值的变化量有关。为了区分系统

的法向动态等值阻抗与戴维南等值阻抗,另写出戴维南等值阻抗表达式^[15]:

$$Z_{THEV} = -\frac{dU}{dI} \quad (6)$$

比较式(5)与式(6),法向动态等值阻抗模不等于戴维南等值阻抗模,即 $|Z_{NOR}| \neq |Z_{THEV}|$ 。

假定 P_{LD}^2 与 Q_{LD}^2 呈非减函数关系,由式(4)可知, S_{LD}^2 、 P_{LD}^2 与 Q_{LD}^2 同时取极值的必要条件是:

$$|Z_{LD}| = |Z_{NOR}| \quad (7)$$

显然,除 $U=0$ 或 $I=0$ 时, $S_{LD}^2=0$,所以 S_{LD}^2 、 P_{LD}^2 与 Q_{LD}^2 同时取极大值。因此,当负荷的静态等值阻抗模等于系统的法向动态等值阻抗模时,负荷的有功功率与无功功率同时取极值,此时网络传输功率取得极值,负荷节点达到电压稳定临界状态。

定义负荷节点的 NIMMI 为:

$$\mu = \frac{|Z_{LD}| - |Z_{NOR}|}{|Z_{LD}|} \quad (8)$$

NIMMI 表征系统当前运行点与系统传输功率极限点之间的距离;当 $\mu > 0$ 时,系统传输功率仍具备一定裕度,系统处于稳定状态;当 $\mu = 0$ 时,系统运行至功率极限点,系统电压达到临界失稳点;当 $\mu < 0$ 时,系统处于失稳状态。因此,可以根据 NIMMI 确定系统节点电压稳定性分布。

1.2 基于法向动态等值阻抗的节点电气耦合系数

NIMMI 可以定量地描述系统运行中负荷节点的电压稳定性,但是无法用来分析负荷节点之间相互影响的关系。文献[16]基于节点间的互阻抗定义了电气连接度指标,根据指标大小评估节点间耦合程度,但只考虑了网络结构,不能反映电力系统的非线性关系和运行状态。

对于一个 n 节点电力网络,节点 i 的系统法向等值阻抗模在数值上等于在节点 i 注入电流变化量为单位电流且其他节点注入电流不变时,节点 i 的电压幅值变化量。在保持其他节点注入电流不变时,根据节点 j 注入电流幅值变化量 dI_j 与节点 i 的电压幅值变化量 dU_i 可以定义节点 j 、 i 之间法向动态等值阻抗模为:

$$|Z_{ijNOR}| = -\frac{dU_i/d\lambda}{dI_j/d\lambda} \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

两节点之间的法向动态等值阻抗模值越大表示两节点之间的电气距离越远,两节点之间的电气耦合关系越弱。定义节点 i 的电气耦合系数为:

$$\delta_{NI} = \frac{1}{\sum_{j=1, j \neq i}^n |Z_{ijNOR}|} \times 10 \quad (10)$$

节点的电气耦合系数可以跟踪系统运行状态,

动态反映运行方式及运行参数改变引起的系统节点间耦合关系的变化。 δ_{Ni} 值较大的节点与其他节点的联系更紧密,易受到系统网络参数和负荷水平改变的影响,电压稳定水平较其他节点波动较大。因此,实时监测 δ_{Ni} 值偏大的节点电压稳定性及变化趋势,便于对系统全局性事故进行预防控制。

2 OLTC 调压效应分析及动态等值参数计算

2.1 OLTC 电压调节效应分析

在图 2 所示含 OLTC 的电力系统中,当节点 j 电压由于负荷水平增加而偏离正常运行电压时,OLTC 分接头动作,改变变比,实现负荷节点电压的恢复。图中, Z_L 为线路阻抗; k 为 OLTC 变比。

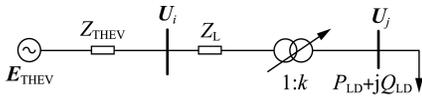


图 2 含 OLTC 的电力系统

Fig.2 Power system containing OLTC

根据式(8),节点 j 的 NIMMI 为:

$$\mu_j = \frac{|Z_{LD}| - k^2 |Z_{THEV} + Z_L|}{|Z_{LD}|} \quad (11)$$

由式(11)可知,节点 j 的 NIMMI 与变比 k 负相关。变比增大,则系统的法向动态等值阻抗模 $|Z_{NOR}| = k^2 |Z_{THEV} + Z_L|$ 增大,电压稳定裕度指标减小,不利于电压稳定。电压稳定性要求与调压要求出现矛盾。不断增大变比至 $\mu_j = 0$ 时,若节点电压仍未满足调压要求,继续增大变比将导致“负调压效应”,直至电压崩溃。可以看出,根据 NIMMI 值能定量分析 OLTC 动作对负荷节点电压稳定性的影响。复杂电力系统中考虑多台 OLTC 协调动作时,将综合影响各节点的 NIMMI 值的求取。

对应于 OLTC 变比的变化,系统运行于不同 PV 曲线的小干扰稳定区域,负荷节点电压稳定临界点发生变化,将 PV 曲线鼻点处的网络传输极限功率点作为系统稳定临界点的判据并不准确。在附录 A 的图 A1 中,曲线 1 表示图 2 中节点 j 在初始功率 P_0 和初始变比 k_1 下的 PV 曲线;当负荷增大至 P' 时,OLTC 动作,曲线 2 表示 OLTC 分接头动作后变比为 k_2 相对应的 PV 曲线。2 条 PV 曲线的交点 c 为节点 j 电压稳定性态改变的实际临界稳定点^[10]。

为使变比调节后节点 j 仍能稳定运行,保证变比改变后系统仍稳定的 NIMMI 为 $\mu_j = \mu_{j0} - \mu_c$,其中 μ_{j0} 为变比变化前节点 j 的 NIMMI 值, μ_c 为交点 c 的 NIMMI 值。根据上述分析可知,计入 OLTC 调节效应后的 NIMMI 所反映的是实现 OLTC 变比调节的最小电压稳定裕度,相比于以 PV 曲线鼻点为临界稳定点更符合实际。

2.2 计及 OLTC 变比的动态等值参数计算

考虑到实际上每次 OLTC 分接头的动作所带来的电压变化量很小,因此采用连续模型来近似描述 OLTC 的变比调节,微分方程为^[17]:

$$\frac{dk_i}{dt} = \frac{1}{T}(U_{j0} - U_j) \quad (12)$$

其中, T 为 OLTC 的时间常数; U_j 和 U_{j0} 分别为 OLTC 二次侧电压和参考电压; k_i 为系统中第 i 台 OLTC 变比。在区间 $[t_0, t]$ 对式(12)两边同时积分得:

$$k_i = k_{i0} + \varepsilon(U_{j0} - U_j) \quad (13)$$

其中, ε 为计入 OLTC 时间常数,与时间变量有关的变比修正参数; k_{i0} 为 OLTC 初始变比。

由于 k_i 变为对 U_j 的函数关系,则导纳矩阵中,OLTC 所在支路对应导纳元素变为对 U_j 的函数关系,对应每一台 OLTC,导纳矩阵 \mathbf{Y} 相对应地有 4 个元素是 U_j 的函数。因此, $\Delta \mathbf{J}$ 与 $dI/d\lambda$ 的求取,需要计入变比带来的参数改变。图 3 为图 2 中 OLTC 的 Π 型等值电路,图中 $y_T = 1/Z_L$ 。

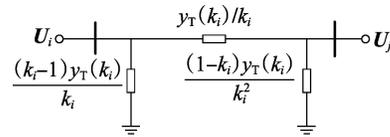


图 3 含 OLTC 支路等值电路

Fig.3 Equivalent circuit of OLTC branch

设注入系统功率参变量为 λ ,注入节点功率可以表示为:

$$\begin{cases} P_{is} = P_{is}(\lambda) \\ Q_{is} = Q_{is}(\lambda) \end{cases} \quad (14)$$

在上述模型下,计及 OLTC 后直角坐标下的潮流方程可以统一表示为:

$$\mathbf{W} = \mathbf{F}(\mathbf{k}, \mathbf{U}_{n-1}, \mathbf{U}_{ph}) \quad (15)$$

其中, $\mathbf{W} = [P_{is} \ Q_{is} \ \cdots \ P_{(n-1)s} \ U_{(n-1)s}^2]^T$; \mathbf{k} 为由 OLTC 变比组成的 $2(n-1)$ 阶矩阵; $\mathbf{U}_{n-1} = [e_1 \ f_1 \ \cdots \ e_{n-1} \ f_{n-1}]^T$; \mathbf{U}_{ph} 为平衡节点电压。

式(15)对 λ 求导,得:

$$\frac{d\mathbf{W}}{d\lambda} = \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{k}} \frac{d\mathbf{k}}{d\lambda} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{U}_{n-1}} \right) \frac{d\mathbf{U}_{n-1}}{d\lambda} \quad (16)$$

$$\frac{d\mathbf{U}_{n-1}}{d\lambda} = (\mathbf{J}_0 + \Delta \mathbf{J}_1)^{-1} \frac{d\mathbf{W}}{d\lambda} \quad (17)$$

$$\mathbf{J}_0 = \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{U}_{n-1}}, \quad \Delta \mathbf{J}_1 = \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{k}} \frac{d\mathbf{k}}{d\lambda} \quad (18)$$

其中, \mathbf{J}_0 为初始状态下使潮流计算收敛的雅可比矩阵; $\Delta \mathbf{J}_1$ 为计及变比后雅可比矩阵的修正项。根据式(17)可得到 $d\mathbf{U}/d\lambda$ 。

根据网络方程:

$$\mathbf{I}_0 = \mathbf{Y}\mathbf{U}_0 \quad (19)$$

其中, $\mathbf{I}_0 = [I_1 \ I_2 \ \dots \ I_n]^T$; $\mathbf{U}_0 = [U_1 \ U_2 \ \dots \ U_n]^T$ 。

式(19)两边同时对 λ 求导,得:

$$\frac{d\mathbf{I}_0}{d\lambda} = \frac{d\mathbf{Y}}{d\lambda} \mathbf{U}_0 + \frac{d\mathbf{U}_0}{d\lambda} \mathbf{Y} \quad (20)$$

系统戴维南等值阻抗为:

$$\mathbf{Z}_{\text{THEV}} = -\frac{d\mathbf{U}_0/d\lambda}{d\mathbf{I}_0/d\lambda} \quad (21)$$

系统等值电势为:

$$\mathbf{E}_{\text{THEV}} = \mathbf{U} + \mathbf{Z}_{\text{THEV}} \mathbf{I} \quad (22)$$

对于任意节点 i, j , 有:

$$\begin{cases} U_i^2 = \mathbf{U}_i \mathbf{U}_i^* \\ I_i^2 = \mathbf{I}_i \mathbf{I}_i^* \end{cases} \quad (23)$$

式(23)对 λ 求导,得到:

$$\begin{cases} \frac{dU_i}{d\lambda} = \frac{\mathbf{U}_i \frac{d\mathbf{U}_i^*}{d\lambda} + \mathbf{U}_i^* \frac{d\mathbf{U}_i}{d\lambda}}{2U_i} \\ \frac{dI_i}{d\lambda} = \frac{\mathbf{I}_i \frac{d\mathbf{I}_i^*}{d\lambda} + \mathbf{I}_i^* \frac{d\mathbf{I}_i}{d\lambda}}{2I_i} \end{cases} \quad (24)$$

对于 PQ 节点 i, j , 满足:

$$|Z_{ij\text{NOR}}| = -\frac{dU_i}{dI_j} \quad (25)$$

当 $i=j$ 时, 式(25)计算得到节点 i 的系统法向动态等值阻抗模值; 当 $i \neq j$ 时, 式(25)计算得到节点 i, j 之间的法向动态等值阻抗模值。因此可根据式(25)计算节点的 NIMMI 值和电气耦合系数。

根据本节动态等值参数的计算方法, 计及 OLTC 调压效应时, 变比改变前后 2 条 PV 曲线交点 c 的 NIMMI 值 μ_c 的计算步骤见附录 B。

2.3 负荷电压静态特性的影响

考虑负荷的静态电压特性, OLTC 变比调节会改变负荷注入空间的电压稳定域以及负荷功率。因此, 考虑电力系统负荷的多样性, 为求取更具有一般意义的电压稳定指标, 本文提出了计及负荷电压静态特性时综合等值参数的求取方法。

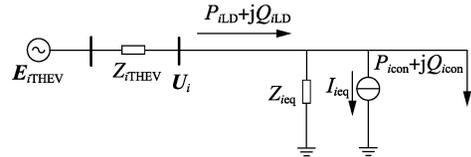
计及电压静态特性的 ZIP 负荷模型为:

$$\begin{cases} P_{iLD} = a_p U_i^2 + b_p U_i + P_{icon} \\ Q_{iLD} = a_q U_i^2 + b_q U_i + Q_{icon} \end{cases} \quad (26)$$

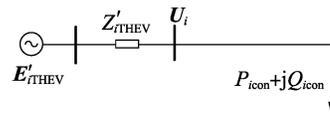
其中, P_{icon}, Q_{icon} 分别为 ZIP 负荷中恒功率部分的有功功率、无功功率。

在上述负荷模型下, 负荷可以视为由恒阻抗负荷、恒电流负荷以及恒功率负荷按不同百分比组成。因此, 为了可以结合 2.2 节中的分析方法, 将 ZIP 负荷中与电压有关的恒阻抗、恒电流部分功率分量移

至等式左边, 使得等式右边只含有 ZIP 中的恒功率部分。图 4(a) 为计及负荷特性等值后的两节点系统, 图 4(b) 为等效后的等值电路。图中, Z_{ieq} 和 I_{ieq} 分别为 ZIP 负荷中恒阻抗负荷及恒电流负荷等值参数; E'_{iTHEV}, Z'_{iTHEV} 为负荷中非恒功率性质功率分量归算至系统侧后的动态等值参数。



(a) 非线性电力系统动态等值图



(b) 简化后的等值电路

图 4 电力系统 ZIP 负荷及其动态等值电路

Fig.4 ZIP load and its dynamic equivalent circuit

计及负荷电压静态特性时, 网络传输功率极限不一定对应于潮流计算中雅可比矩阵奇异的情况^[18]。因此, 动态等值参数的求取应考虑计及负荷电压静态特性给雅可比矩阵带来的修正项, 计算过程见附录 C。

3 仿真分析

3.1 多台 OLTC 动作对静态电压稳定性的影响

基于上述原理, 在 IEEE 14 节点标准系统中, 定量分析复杂系统中多台 OLTC 协调动作对系统 PQ 节点电压稳定的影响, 系统拓扑结构图见附录 A 中图 A2。考虑支路 8、9 以及支路 11 上变压器分别为 OLTC₁、OLTC₂ 和 OLTC₃, 变比分别为:

$$k_1 = k_{10} + \varepsilon_1 (U_{50} - U_5) \quad (27)$$

$$k_2 = k_{20} + \varepsilon_2 (U_{40} - U_4) \quad (28)$$

$$k_3 = k_{30} + \varepsilon_3 (U_{90} - U_9) \quad (29)$$

其中, $\varepsilon = 0$ 表明相应 OLTC 分接头不动作; $\varepsilon \neq 0$ 表明相应 OLTC 参与调节。参考电压值均为 1.0 p.u.。

负荷取恒功率模型, 在负荷水平增加至 $\lambda = 1.6$ 时, 负荷功率同步增大, 负荷功率按照初始功率比例在各电源之间分配, 并考虑 PV 节点无功越限的情况。在 OLTC 变比调节允许范围内, 取上述变比修正参数不同值, 得到多台 OLTC 分接头动作的不同组合运行方式 S₁—S₆, 各运行方式下的参数取值如表 1 所示。其中, S₁ 表示在负荷水平增加后, 无 OLTC 参与调压; S₂ 和 S₃ 表示 OLTC₁ 参与调压, OLTC₂ 和 OLTC₃ 不动作; S₄—S₆ 表示多台 OLTC 参与调压。

在上述不同组合运行方式下, 负荷节点电压值和 NIMMI 值(标么值)分布情况分别如附录 A 中图 A3 和图 5 所示。

表 1 S_1-S_6 方式下的参数取值

方式	ε_1	ε_2	ε_3	方式	ε_1	ε_2	ε_3
S_1	0	0	0	S_4	0.4	0.2	0
S_2	0.2	0	0	S_5	0.4	0.2	0.2
S_3	0.4	0	0	S_6	0.4	0.4	0.2

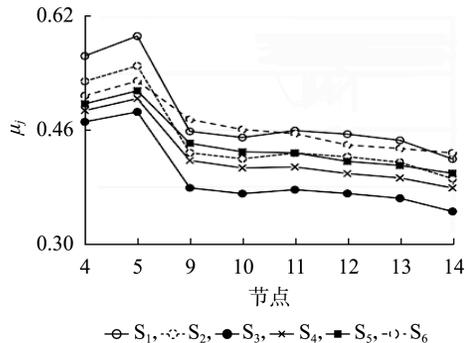


图 5 不同组合运行方式下节点的 NIMMI 值
Fig.5 Nodes' NIMMI under S_1-S_6

根据附录 A 中图 A3 和图 5, 分析 OLTC 在不同组合方式下动作对系统电压稳定性的影响, 得到如下结论。

(1) OLTC₁ 单独参与电压调节时 (S_2, S_3), 在恢复负荷侧电压的同时会使得系统电压稳定性变差。随着分接头的继续动作, 系统电压稳定性进一步恶化。在电压稳定性要求与调压要求矛盾时, OLTC 的动作在一定范围内可以实现负荷侧电压水平的恢复, 当 NIMMI 值接近 0 时, 分接头的连续动作将导致“负调压效应”, 直至发生电压崩溃。

(2) 从系统电压幅值上看, 所有 OLTC 同时参与调节时负荷电压得到了最大限度的改善。因此, 在重载情况下, 应调节具有可靠电压支撑作用的 OLTC₂ 和 OLTC₃ 来恢复系统电压水平, 从而避免出现调整 OLTC 导致的电压失稳现象。在不同组合方式下, 节点 14 的 NIMMI 值均最小, 为系统薄弱节点, 需要重点监测。

表 2 给出了在负荷水平 $\lambda = 1.6$ 下, 节点 5 在不同组合运行方式切换过程中临界稳定点的 NIMMI 值 μ_c 。可以看出, 节点 5 的 μ_c 主要受 OLTC₁ 动作的影响, 其他 2 台 OLTC 分接头调节对节点 5 的临界稳定点的影响很小。对比 S_1 切换至 S_2, S_3 的 μ_c 大小可知, OLTC 变比调整幅度越大, μ_c 值越大, 稳定运行区域缩小越明显, 这解释了文献 [9] 提出的 OLTC 越级调压可能导致系统跳变到不稳定运行区域的问题。

表 2 临界稳定点的 NIMMI 值

方式切换	μ_c	方式切换	μ_c
$S_1 \rightarrow S_2$	0.023 2	$S_3 \rightarrow S_4$	0.008 8
$S_1 \rightarrow S_3$	0.051 7	$S_4 \rightarrow S_5$	0
$S_2 \rightarrow S_3$	0.019 7		

3.2 电气耦合系数

图 6 为 OLTC 不同组合运行方式下各节点的电气耦合系数。图 6 表明, 在多台 OLTC 的多次分接头动作后, 节点间电气耦合系数大小差距减小, 但是不改变节点电气耦合关系的强弱分布。节点 5 及节点 11 的 δ_{NI} 值较大, 表明这 2 个节点处于系统电气结构的关键位置。这 2 个节点的电压稳定性水平较高, 维持电压的能力较强, 但同时电气耦合系数较大, 节点发生故障将对全网产生严重影响, 因此具备监测价值。

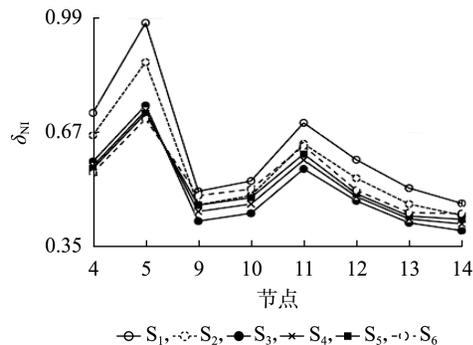


图 6 不同组合运行方式下的电气耦合系数
Fig.6 δ_{NI} under S_1-S_6

节点 14 为系统电压稳定薄弱节点, 节点 5 和节点 11 的电气耦合系数较大, 均为系统电压稳定性分析的关键节点。表 3 为不同负荷水平下, 不同组合方式中节点 5、节点 11 及节点 14 的 NIMMI 值。附录 D 中表 D1 给出了 $\lambda = 1.1$ 及 $\lambda = 1.7$ 下节点 δ_{NI} 值的大小排序。

表 3 不同负荷水平下的 NIMMI 值
Table 3 NIMMI under different load levels

λ	节点	μ_j			
		S_1	S_2	S_3	S_5
1.1	5	0.818 2	0.795 5	0.766 3	0.773 4
	11	0.742 6	0.719 0	0.688 7	0.714 5
	14	0.716 3	0.693 9	0.665 1	0.693 4
1.4	5	0.738 7	0.707 3	0.663 9	0.676 7
	11	0.637 7	0.607 9	0.566 6	0.601 8
	14	0.604 3	0.576 6	0.538 0	0.576 0
1.7	5	0.415 7	0.380 9	0.307 8	0.370 6
	11	0.277 4	0.262 2	0.215 3	0.288 9
	14	0.241 3	0.230 5	0.191 0	0.263 0

分析表 3 和表 D1 中数据可以得到如下结论。

(1) 系统运行状态的变化会改变系统节点间的电气耦合强弱分布。在同一运行状态下, 节点 5 与节点 11 的 NIMMI 值较大, 但是当 OLTC 的动作不利于电压稳定时, 与节点 14 相比, 这 2 个节点的电压稳定裕度指标下降速度较快。在轻载时, 节点 5 的电气耦合系数较大, 但节点 5 靠近电源点, 节点 2 尚未出现无功越限, 能给予节点 5 一定的电压支撑; 在重载时, 节点 5 的 NIMMI 值下降幅度明显大于于

点 11。

(2)随着负荷水平的提高,节点的 NIMMI 值不断减小。考虑电力系统其他因素的正常波动,如新负荷的投入等,为保证系统安全稳定运行,OLTC 变比调节应在一定范围内,NIMMI 值可以作为确定变比调节范围的依据。若要求系统最薄弱节点电压稳定指标 $\mu_i > 0.2$,则 $\lambda = 1.7$,OLTC₁ 单独调节下, $\mu_{14} = 0.191 0$ 对应变比为 1.072 7,通常设置的 $\pm 10\%$ 的变比调节范围过于乐观。

3.3 负荷电压静态特性的影响分析

取 $\lambda = 1.6$,对初始 PQ 节点取负荷静特性 ZIP 负荷模型(30%恒阻抗、30%恒电流、40%恒功率),在 S₁—S₃ 方式下计算节点的系统法向等值阻抗模值 $|Z_{\text{NOR}}|$ 及 NIMMI 值,表 4 给出了恒功率负荷模型与 ZIP 负荷模型下节点 14 的参数计算值,其中 $|Z_{\text{NOR}}|$ 及 NIMMI 值均为标么值。

表 4 节点 14 的 NIMMI 值

Table 4 NIMMI of Node 14

负荷模型	$ Z_{\text{NOR}} $			μ_{14}		
	S ₁	S ₂	S ₃	S ₁	S ₂	S ₃
恒功率	1.464 7	1.591 3	1.774 7	0.419 2	0.391 6	0.345 5
ZIP	1.434 3	1.548 6	1.710 9	0.493 2	0.466 8	0.426 1

分析表 4 可得,在不同组合方式下,与恒功率负荷模型相比,ZIP 负荷模型下节点 NIMMI 值明显增大, $|Z_{\text{NOR}}|$ 值均有所减小。这是由于 ZIP 负荷模型中的恒阻抗及恒电流性质负荷被等值至系统一侧,且注入功率元素值相对恒功率负荷模型变小。虽然计及负荷电压静特性在一定程度上通过减小系统侧等值阻抗提高了电压稳定性,但不会改变 NIMMI 值随 OLTC 分接头调整的变化趋势。

4 结论

(1)本文提出了应用非线性动态等值原理定量评估复杂系统中多台 OLTC 协调动作对电压稳定性影响的分析方法。通过计算节点的 NIMMI 值,可以准确反映 OLTC 在不同组合方式下系统电压稳定性的分布和变化。根据 NIMMI 值能有效评价 OLTC 协调动作方案的合理性,从而在提高系统电压水平的同时保证电压稳定性,避免 OLTC 调整导致电压失稳甚至电压崩溃的现象。

(2)通过计算系统负荷节点的电气耦合系数指标,可以动态追踪系统不同运行状态下 OLTC 调整引起的节点间电气耦合关系的改变。电气耦合系数可以准确识别 OLTC 变比调节过程中电压稳定水平波动较大的节点,这些节点与电压稳定水平较差的节点都是系统的关键节点,重点监测这些节点的电压稳定性水平及变化趋势最具有价值。

(3)OLTC 的电压调节效应使系统的临界稳定

运行点不再是网络传输功率极限点。OLTC 变比调节幅度越大,系统运行点距离电压稳定临界点越近。临界稳定运行点的 NIMMI 值主要与距离较近的 OLTC 动作有关。进一步,证明了计及负荷电压静特性会减小系统侧法向动态等值阻抗模值来提高电压稳定性,但不会改变 OLTC 调整引起的电压稳定性变化趋势。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 厉吉文,张明军,安建强. 变压器有载自动调压控制系统[J]. 电力自动化设备,1999,19(4):31-33.
LI Jiwen,ZHANG Mingjun,AN Jianqiang. An automatic system for regulating the voltage of on-load tap changing transformers[J]. Electric Power Automation Equipment,1999,19(4):31-33.
- [2] MEDANIC J,ILIC-SPONG M,CHRISTENSEN J. Discrete models of slow voltage dynamics for under load tap-changing transformer coordination[J]. IEEE Transactions on Power Systems,1987,2(4):873-880.
- [3] OHTSUKI H,YOKOYAMA A,SEKINE Y. Reverse action of on-load tap changer in association with voltage collapse[J]. Power Engineering Review IEEE,1991,6(1):300-306.
- [4] 黄俊杰,李晓明. 基于动态模型的无触点有载调压系统[J]. 电力自动化设备,2011,31(8):52-57.
HUANG Junjie,LI Xiaoming. Contactor-less OLTC system based on dynamic model[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(8):52-57.
- [5] 赵建伟,严正,徐潇源,等. 戴维南等值参数时域仿真跟踪算法分析与改进[J]. 电力自动化设备,2017,37(7):115-122.
ZHAO Jianwei,YAN Zheng,XU Xiaoyuan,et al. Analysis and improvement of Thevenin equivalent parameter tracking based on time-domain simulation[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(7):115-122.
- [6] 周念成,苏宇,王强钢,等. 基于 IGBT 的配电变压器有载调压开关参数设计及分析[J]. 电力自动化设备,2018,38(7):35-42.
ZHOU Niancheng,SU Yu,WANG Qianggang,et al. Parameter design and analysis of IGBT-based on-load tap changers for distribution transformer[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(7):35-42.
- [7] 张靖,文劲宇,程时杰,等. 电力系统电压稳定性的平衡点分析方法[J]. 电网技术,2006,30(10):13-17.
ZHANG Jing,WEN Jinyu,CHENG Shijie,et al. Analysis of power system voltage stability with equilibrium points[J]. Power System Technology,2006,30(10):13-17.
- [8] 艾琳,姜彤,杨以涵. 基于节点导纳矩阵形式的在线电压稳定分析[J]. 中国电机工程学报,2010,30(22):51-56.
AI Lin,JIANG Tong,YANG Yihan. On-line voltage stability analysis based on bus admittance matrix form[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(22):51-56.
- [9] ZHU T X,TSO S K,LO K L. An investigation into the OLTC effects on voltage collapse[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2000,15(2):515-521.
- [10] 彭志伟,胡国根,韩帧祥. 有载调压变压器调整对电力系统电压稳定性的影响[J]. 中国电机工程学报,1998,18(6):408-412.
PENG Zhiwei,HU Guogen,HAN Zhenxiang. The power system voltage stability affected by on-load tap changer[J]. Proceedings of the

- CSEE, 1998, 18(6):408-412.
- [11] 段献忠,何仰赞,陈德树. 有载调压变压器与电压稳定性关系的静态分析[J]. 电力系统自动化, 1995, 19(4):22-27.
DUAN Xianzhong, HE Yangzan, CHEN Deshu. Static analysis of the relation between on-load tap changer and voltage stability[J]. Automation of Electric Power Systems, 1995, 19(4):22-27.
- [12] 王涛,张尚,顾雪平,等. 电力系统运行状态的趋势辨识[J]. 电工技术学报, 2015, 30(24):171-180.
WANG Tao, ZHANG Shang, GU Xueping, et al. Trends identification of power system operating states[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(24):171-180.
- [13] 张学清,梁军,董晓明. 基于累积指数的电网电压稳定性性能的评估[J]. 电工技术学报, 2012, 27(7):235-241.
ZHANG Xueqing, LIANG Jun, DONG Xiaoming. An assessment for voltage stability performance of power grid based on cumulating index[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(7):235-241.
- [14] 刘光晔,施海亮,杨以涵. 非解析复变电力系统电压稳定的动态分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10):50-56.
LIU Guangye, SHI Hailiang, YANG Yihan. Comprehensive dynamic analysis method for power system static voltage stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10):50-56.
- [15] 刘光晔,杨以涵. 电力系统电压稳定与功角稳定的统一分析原理[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(13):135-149.
LIU Guangye, YANG Yihan. Theoretical foundation of power system voltage and angle stability unified analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(13):135-149.
- [16] 谭玉东,李欣然,蔡晔,等. 基于电气距离的复杂电网关键节点识别[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1):146-152.
TAN Yudong, LI Xinran, CAI Ye, et al. Critical node identification for complex power grid based on electrical distance[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1):146-152.
- [17] 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, 2003:425-427.
- [18] 李欣然,贺仁睦,章健,等. 负荷特性对电力系统静态电压稳定性的影响及静态电压稳定性广义实用判据[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(4):26-30.
LI Xinran, HE Renmu, ZHANG Jian, et al. Effect of load characteristics on power system steady-state voltage stability and the practical criterion of voltage stability[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(4):26-30.

作者简介:



李国强

李国强(1993—),男,安徽宿州人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统电压稳定分析(E-mail:1272948385@qq.com);

刘光晔(1960—),男,湖南长沙人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统分析与控制、输变电技术、铁路牵引供电系统、电力系统继电保护。

Quantitative evaluation method of voltage stability affected by multi-OLTC coordination

LI Guoqiang, LIU Guangye, HOU Longyu, JIN Long, YANG Yaqiao

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: In order to quantitatively analyze the effect of OLTC (On-Load Tap Changer) regulation on voltage stability in complex systems, according to the principle of extremum analysis of nonlinear equations, the necessary conditions for the network transmission power limit are deduced, and the NIMMI (Normal Impedance Modulus Margin Index) is proposed to analyze the voltage stability of load nodes. Based on the normal dynamic equivalent impedance, the electrical coupling coefficient index that can dynamically track the degree of contact tightness between nodes of the system is proposed. Considering the characteristics of nonlinear power system with OLTC, taking into account the effect of transformation ratio, based on the Newton-Raphson method for solving the power flow equations, the Jacobian matrix for the convergence of load flow calculation in the initial state is modified to calculate the dynamic equivalent parameters of nodes, and the NIMMI which takes into account load characteristics and OLTC voltage regulation effects is further proposed. The proposed NIMMI can accurately quantify and analyze the comprehensive influence of multi-OLTC coordinated action on the system voltage stability in a complex system, and can be used for assessing the rationality of the OLTC coordinated operation scheme and transformation ratio adjustment range of the entire network. The electrical coupling coefficient index can identify the key nodes with fast voltage instability accurately and effectively. The simulative results of the IEEE 14-bus system verify the effectiveness and correctness of the proposed analysis method.

Key words: electric power systems; voltage stability; normal impedance modulus margin index; on-load tap changer; dynamic equivalence

附录 A

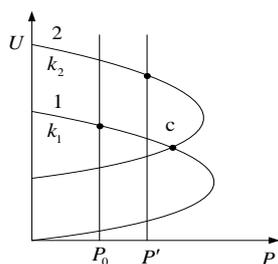


图 A1 OLTC 调节下的 PV 曲线

Fig.A1 PV curves under OLTC regulation

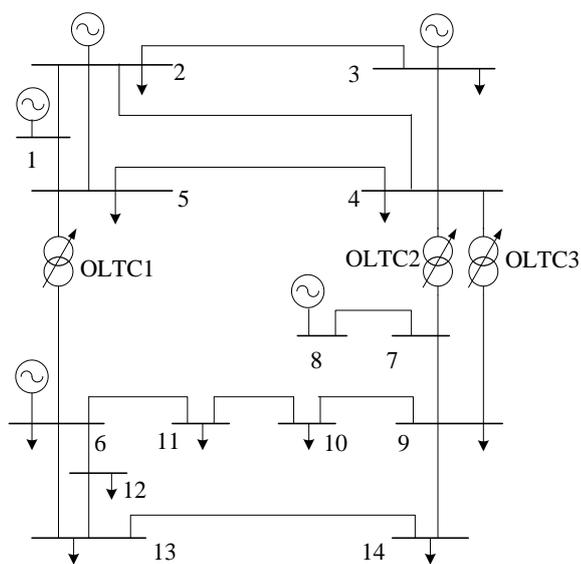


图 A2 IEEE 14 节点系统拓扑结构图

Fig.A2 Topological structure of IEEE 14-bus system

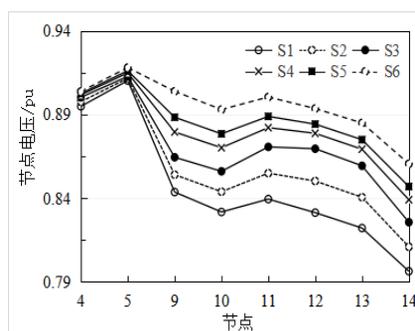


图 A3 不同组合运行方式下的节点电压值

Fig.A3 Nodes' voltage of S1-S6

附录 B

交点 c 的法向阻抗模裕度值 μ_c 的计算步骤如下:

- a. 先根据潮流计算分别求出有载调压变压器变比为 k_1 和 k_2 时, 所分析节点对应的法向

等值阻抗模值 $|Z_{\text{NOR}}|$ ，戴维南等值电势 E_{THEV} 和戴维南等值阻抗 Z_{THEV} ；

b. 分别作出 k_1 和 k_2 对应的戴维南等效电路；

c. 保持负荷功率因数不变，根据戴维南等效电路分别作出 k_1 和 k_2 对应的PV曲线： $f_1(P, U)=0$ ， $f_2(P, U)=0$ ，得到交点 (P_c, U_c) ；

d. 根据 $|Z_{\text{LD}}|=P_c/I_c^2\cos\varphi$ ，计算负荷阻抗模值，结合步骤a求得的 $|Z_{\text{NOR}}|$ ，计算c点的法向阻抗模裕度值 μ_c 。

附录 C

计及负荷电压静特性时动态等值参数的计算方法具体如下。

根据式(26)可得：

$$\begin{cases} P_{\text{icon}} = P_{\text{iLD}} - (a_p U_i^2 + b_p U_i) \\ Q_{\text{icon}} = Q_{\text{iLD}} - (a_q U_i^2 + b_q U_i) \end{cases} \quad (\text{C1})$$

潮流方程可以统一表示为：

$$\mathbf{W}' = \mathbf{F}(\mathbf{U}_{n-1}, \mathbf{U}_{\text{ph}}) - \mathbf{H}(\mathbf{U}_{n-1}) \quad (\text{C2})$$

与式(15)相区别，任意ZIP负荷节点 i ， \mathbf{W}' 中相应注入功率元素为：

$$\mathbf{W}' = [P_{1s} \quad Q_{1s} \quad \cdots \quad P_{\text{icon}} \quad Q_{\text{icon}} \quad \cdots \quad P_{(n-1)s} \quad U_{(n-1)s}^2]^T$$

$$\mathbf{H}(\mathbf{U}_{n-1}) = [0 \quad 0 \quad \cdots \quad a_p(e_i^2 + f_i^2) + b_p\sqrt{(e_i^2 + f_i^2)} \quad a_q(e_i^2 + f_i^2) + b_q\sqrt{(e_i^2 + f_i^2)} \quad \cdots \quad 0 \quad 0]^T$$

式(C1)对 λ 求导，得：

$$\frac{d\mathbf{W}'}{d\lambda} = \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{U}_{n-1}} - \frac{d\mathbf{H}}{d\mathbf{U}_{n-1}} \right) \frac{d\mathbf{U}_{n-1}}{d\lambda} \quad (\text{C3})$$

根据式(C3)，有：

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{U}_{n-1}}{d\lambda} &= (\mathbf{J}_0 + \Delta\mathbf{J}_2)^{-1} \frac{d\mathbf{W}'}{d\lambda} \\ \mathbf{J}_0 &= \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{U}_{n-1}}, \quad \Delta\mathbf{J}_2 = -\frac{d\mathbf{H}}{d\mathbf{U}_{n-1}} \end{aligned} \quad (\text{C4})$$

其中， \mathbf{J}_0 为初始状态下使潮流计算收敛的雅可比矩阵； $\Delta\mathbf{J}_2$ 为计及负荷电压静态特性后雅可比矩阵的修正项。根据式(30)，结合式(19)、(20)、(24)和式(25)计算节点的NIMMI和电气耦合系数值。

附录 D

表 D1 不同负荷水平下的电气耦合系数排序

Table D1 δ_{NI} sequencing under different load levels

λ	δ_{NI} 排序
1.1	5,11,4,12,10,9,13,14
1.4	5,4,11,12,9,10,13,14
1.7	5,4,11,12,10,13,9,14