

电力系统动态电压的单调控制特性

张谦¹, 陈民权¹, 郝文清¹, 李振焱¹, 甘德强¹, 范翔²

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 贵州电网有限责任公司电力调度控制中心, 贵州 贵阳 550002)

摘要:高比例新能源和电力电子设备的接入使得当前电网对动态电压的变化更加敏感。将单调控制系统理论应用于动态电压问题, 提出输入-输出单调的判定条件, 指出动态电压过程中存在单调控制特性。借助该理论论证不同规模交流系统中低压减载控制与动态电压间的单调特性, 并在单机系统与区域电网中进行验证。对于新能源接入后的电力系统, 简化其故障恢复期间的动态电压模型, 在论证其单调控制特性的基础上, 对潜在的反复低电压穿越问题进行预判, 并在实际新能源送端电网中对该问题进行仿真, 验证了所提改进策略的有效性。

关键词:电力系统; 动态电压; 单调控制; 低压减载; 预防控制; 故障恢复

中图分类号: TM 711

文献标志码: A

DOI: 10.16081/j.epae.202203026

0 引言

目前对电力系统电压问题的研究主要集中在静态电压领域, 基于静态电压理论分析方法的控制策略在生产调度、紧急控制等方面起到了重要作用, 能够有效降低节点电压问题的严重程度。但电力系统电压问题本质上是一个动态问题, 基于代数方程的静态电压研究没有考虑到系统中各元件的动态因素, 无法反映电压动态过程, 如执行低压减载控制策略后需要防止的电压问题除了静态电压失稳外, 还有大扰动下的暂态电压失稳以及动态电压失稳等^[1]。严格意义上而言, 静态电压理论仅能描述不同控制参数(如减载量)对稳态平衡点的影响, 而不能描述不同稳态平衡点间的电压动态变化过程, 尤其是不同参数对大扰动下暂态电压变化的影响。

近年来, 随着高比例电力电子设备接入电网, 系统对动态电压的变化更为敏感, 控制器参数设置不当易导致直流、新能源机组等控制策略的切换, 进而诱发直流闭锁、新能源切机脱网, 甚至电压驱动型的连锁故障。此外, 大量可再生能源接入电网也给动态电压问题分析带来了更多的不确定性因素。因此, 对电网动态电压稳定的研究尤其重要, 这对于防止电压失稳、预防故障等都有重要意义^[2]。

目前对动态电压问题的研究方法有直接法^[3]、

动态潮流法^[4]、时域仿真法^[5]和轨迹灵敏度法。直接法虽然物理意义清晰, 能给出稳定判据, 但其能量函数的构建复杂, 也难以得到一个可靠的临界能量, 对不同运行状态的适应性较差。对动态潮流法的研究较成熟, 但该方法实质是连续潮流法, 对动态元件的分析仍是基于稳态, 难以考虑故障期间的动态特性。时域仿真法完整考虑了系统元件的动态行为, 所得结果可靠, 但该方法存在计算耗时、难以考虑所有工况、无法直接指导设计等问题, 常用于校核和验证环节, 如在确定低压减载方案时, 在基于潮流分析方法进行减载量配置后, 可通过时域仿真法来验证潮流分析方法的有效性以及确定切负荷的延迟时间, 整个过程需考虑控制方式(分散型与集中型)、安装地点所在枢纽变电站的选取、减载装置动作条件间的延迟、切负荷量、仿真计算等问题, 大量文献^[6]对这些问题展开了研究并取得了一定的成果, 但缺少严格的数学理论基础。轨迹灵敏度常用于描述动态系统的状态变量对参数的依赖性, 文献^[7]最早将该方法应用于电压稳定问题的分析, 建立了适用于电力系统的轨迹灵敏度模型, 并推导了严格的数值计算方法。轨迹灵敏度法需进行线性化预处理, 且计算过程依赖于时域仿真结果, 对于输出量为电压的问题还涉及微分方程与代数方程间的交替求解, 大量研究对该方法的计算精度和效率进行了探讨^[8]。轨迹灵敏度法在电压稳定的应用方面: 文献^[9]提出轨迹灵敏度指标(TSI), 用于指导动态无功的选址与定容; 文献^[10]基于轨迹灵敏度分析保证暂态电压安全的紧急切负荷控制策略, 并提出系列优化算法。

本文将单调控制系统理论应用于动态电压问题的分析, 通过引入时间断面面积分的概念, 避免代数变量与状态变量间的交替求解过程。相较于传统轨迹灵敏度法, 该方法重点关注的是不同控制量对响应应曲线间的保序特性^[11], 而不是单一时刻的灵敏度

收稿日期: 2021-07-14; 修回日期: 2022-01-26

在线出版日期: 2022-03-17

基金项目: 国家重点研发计划智能电网技术与装备重点专项(2016YFB0900605); 国家电网公司总部科技项目(5100-202040007A-0-0-00)

Project supported by the Key Project of Smart Grid Technology and Equipment of National Key Research and Development Plan of China(2016YFB0900605) and the Science and Technology Program of Headquarters of State Grid Corporation of China(5100-202040007A-0-0-00)

数值,从一个新的角度分析动态电压控制问题,有助于指导控制设计与参数选择,并且可以拓展到电压问题之外的其他动态过程研究中。

1 单调控制系统理论

1.1 单调控制系统

Hirsch 和 Matano 在 1980 年对常微分方程和抛物线形偏微分方程展开的系列研究,使得单调控制系统理论在数学界受到广泛关注^[12]。目前单调控制系统理论已被广泛应用于生态系统、化学反应动力学、传染病学、人口学等多个领域^[13]。由微分方程表示的动态系统为:

$$\dot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{g}(\boldsymbol{x}) \quad (1)$$

式中:状态变量 $\boldsymbol{x} \in X \subseteq \mathbf{R}^n$, X 为巴拿赫空间中的开子集, n 为状态变量维数; \boldsymbol{g} 为连续映射 $X \rightarrow \mathbf{R}^n$ 。

令系统式(1)对应的雅可比矩阵为:

$$J(\boldsymbol{x}) = \frac{\partial \boldsymbol{g}(\boldsymbol{x})}{\partial \boldsymbol{x}} \in \mathbf{R}^{n \times n} \quad (2)$$

如果对任意 $\boldsymbol{x} \in X$, $J(\boldsymbol{x})$ 满足矩阵内所有非对角元素都是非负的,即 $J(\boldsymbol{x})$ 为梅兹内矩阵,则系统 $\dot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{g}(\boldsymbol{x})$ 是单调系统,并且该系统在 t 时刻关于初值 \boldsymbol{x}_0 的解 $\phi(t, \boldsymbol{x}_0)$ 具有如下保序性质:

$$\xi_1 \geq \xi_2 \Rightarrow \phi(t, \xi_1) \geq \phi(t, \xi_2) \quad t \geq 0$$

式中: ξ_1 、 ξ_2 为系统状态变量的初值。

建立在常微分方程基础上具备分量保序特征的单调系统被定义为合作系统。

1.2 输入-输出单调控制系统

在电力系统稳定分析中,往往更加关注输入量与输出量间的单调保序特征^[14]。

考虑如下输入-输出系统:

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{u}) \\ \boldsymbol{y} = \boldsymbol{h}(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{u}) \end{cases} \quad (3)$$

式中:控制变量(输入量) $\boldsymbol{u} \in U$, 输出量 $\boldsymbol{y} \in Y$, U 、 Y 分别为控制集、输出集,所有状态变量、控制变量和输出量均定义在欧氏空间下; \boldsymbol{f} 为 $X \times U \rightarrow \mathbf{R}^n$, 满足局部李普希茨条件; \boldsymbol{h} 为输出函数。

对于给定的控制变量 \boldsymbol{u}_1 、 \boldsymbol{u}_2 , 若上述系统满足:

$$\xi_1 \geq \xi_2, \boldsymbol{u}_1 \geq \boldsymbol{u}_2 \Rightarrow \boldsymbol{h}(t, \xi_1, \boldsymbol{u}_1) \geq \boldsymbol{h}(t, \xi_2, \boldsymbol{u}_2) \quad t \geq 0$$

则该系统是输入-输出单调控制系统。

对于合作系统,输入-输出系统是否单调可通过如下条件进行判断:

$$\begin{cases} \frac{\partial f^i}{\partial x^j}(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{u}) \geq 0 \quad \forall \boldsymbol{x} \in X, \forall \boldsymbol{u} \in U, \forall i \neq j \\ \frac{\partial f^i}{\partial u^s}(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{u}) \geq 0 \quad \forall \boldsymbol{x} \in X; \forall \boldsymbol{u} \in U; \forall i, s \\ \frac{\partial h^k}{\partial x^j}(\boldsymbol{x}) \geq 0 \quad \forall \boldsymbol{x} \in X; \forall k, j \end{cases} \quad (4)$$

式中: f^i 、 x^j 、 u^s 、 h^k 分别为 \boldsymbol{f} 、 \boldsymbol{x} 、 \boldsymbol{u} 、 \boldsymbol{h} 的第 i 、 j 、 s 、 k 个

元素。

电力系统动态电压模型往往不满足上述单调判据条件,根据文献[15]可以进一步得到对于单输出模型更加通用的单调性判定条件。

在任意时刻 t , 单输出模型的输出函数 h 均可视为控制变量 \boldsymbol{u} 和状态变量 \boldsymbol{x} 的函数,参考微积分基本公式:

$$G(a) - G(b) = \int_0^1 \frac{\partial G}{\partial v} [b + r(a-b)] (a-b) dr \quad (5)$$

式中: a 、 b 为连续函数 $G(v)$ 的自变量取值; r 为积分变量。

假设 \boldsymbol{x}_1 、 \boldsymbol{x}_2 分别为 t 时刻对应于控制变量 \boldsymbol{u}_1 、 \boldsymbol{u}_2 的状态变量,由此推导出输入-输出单调的判定条件为:

$$\begin{aligned} h(t, \boldsymbol{x}_2, \boldsymbol{u}_2) - h(t, \boldsymbol{x}_1, \boldsymbol{u}_1) = & \int_0^1 \sum_{j=1}^n \frac{\partial h}{\partial x^j}(\boldsymbol{x}_1 + r(\boldsymbol{x}_2 - \boldsymbol{x}_1), \boldsymbol{u}_1 + r(\boldsymbol{u}_2 - \boldsymbol{u}_1)) (x_2^j - x_1^j) dr + \\ & \int_0^1 \sum_{s=1}^m \frac{\partial h}{\partial u^s}(\boldsymbol{x}_1 + r(\boldsymbol{x}_2 - \boldsymbol{x}_1), \boldsymbol{u}_1 + r(\boldsymbol{u}_2 - \boldsymbol{u}_1)) (u_2^s - u_1^s) dr \geq 0 \end{aligned} \quad (6)$$

式中: m 为控制变量维数。

在应用积分判据式(6)的过程中,需要论证在任意控制变量取值下的输入-输出单调特性,通常可假设控制变量 \boldsymbol{u}_1 、 \boldsymbol{u}_2 相差不大,将偏导结果视为恒定值进行积分估算。

2 低压减载过程中的单调控制现象

2.1 假设条件

1) 假设同步机功角短期摇摆不大。

同步机功角摇摆主要是由大扰动导致的,通常而言,故障切除后的暂态电压恢复快,在从故障切除到恢复至正常电压的短暂过程中同步机功角尚未摆开,因此,对于稳定运行点附近的电压动态研究,忽略同步机功角变化的假设是合理的。

2) 假设同步机内电动势变化与同步机和减载点间的电气距离成正相关。

对于电力系统而言,节点与减载点间的电气距离越远,节点受到的影响越小,以 39 节点标准系统为例进行说明,节点编号和参数设置参考文献[16]。假设节点 20 过载运行,该节点为全网电压最低点,在 20 个周期末切除该节点上 50% 的静态负荷,附录 A 图 A1 为与减载点电气距离由近及远的同步机 34、37、30 的 q 轴暂态电动势 E'_q 的变化曲线,计算得到其 5 s 内的偏差率分别为 6.4%、3.6%、1.5%,可见,同步机内电动势变化与减载点距离近似成正相关,即减载行为对电气距离最近的同步机 34 的内电动势影响最大。

2.2 单机单负荷系统中的单调控制现象

下面基于附录 A 图 A2 所示单机单负荷系统对

单调控制现象进行数学解析推导,为了便于理解,本文中同步机采用最简单的经典模型,负荷也采用最简单的静态恒阻抗模型。设置系统参数如下:同步机暂态电抗 $X' = 0.25$ p.u., d 轴同步电抗 $X_d = 1.0$ p.u., d 轴开路暂态时间常数 $T'_{d0} = 5$ s, 惯性时间常数 $T_J = 6$ s; 外接电抗(包括变压器和输电线路的电抗) $X_1 = 0.1$ p.u.; 负荷有功为 80 MW, 功率因数为 0.8。

令 \mathbf{x} 由系统的 4 个状态变量组成, 分别为同步机功角 δ 、转速 ω 、 q 轴暂态电动势 E'_q 、励磁电压 E_{fd} ; 控制变量 u 为负荷节点减载比率; 输出量 y 为负荷节点电压。系统数学模型为:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}, u) \\ y = h(\mathbf{x}, u) \end{cases} \quad (7)$$

首先分析代数部分, 根据电路方程得到负荷节点电压表达式为:

$$V_1 = \frac{R_L + jX_L}{(1-u)(jX' + jX_1) + (R_L + jX_L)} E'_q e^{j\delta} \quad (8)$$

式中: V_1 为负荷节点电压; $R_L + jX_L$ 为等值负荷阻抗。

令 $X_u = (1-u)(X' + X_1) + X_L$, 则负荷节点电压幅值 V_1 表达式可简化为:

$$V_1 = K_1 E'_q = \frac{\sqrt{R_L^4 + X_L^2 X_u^2 + R_L^2 (X_u^2 + X_L^2)}}{R_L^2 + X_u^2} E'_q \quad (9)$$

式中: K_1 为 V_1 对 E'_q 的灵敏度系数。

同理, 可以推导同步机机端节点电压 V_g 的幅值 V_g 为:

$$V_g = K_2 E'_q = \frac{\sqrt{R_L^4 + X_u^2 (X_L + X_1)^2 + R_L^2 [(X_L + X_1)^2 + X_u^2]}}{R_L^2 + X_u^2} E'_q \quad (10)$$

式中: K_2 为 V_g 对 E'_q 的灵敏度系数。

当同步机配置比例型励磁电压调节器后, 微分方程部分可以写为:

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega_s (\omega - 1) \\ M\dot{\omega} = P_M - P_e \\ T'_{d0} \dot{E}'_q = E_{fd} - E'_q - (X_d - X') I_d \\ T_A \dot{E}_{fd} = K_A V_{ref} - E_{fd} - K_A V_g \end{cases} \quad (11)$$

式中: ω_s 为参考频率; M 为同步机惯量系数; P_M 、 P_e 分别为同步机的机械功率和电磁功率; I_d 为同步机 d 轴电流; V_{ref} 为电压调节内部参考值; $T_A = 0.2$ s 为调节器时间常数; $K_A = 5$ 为调节器放大系数。

V_{ref} 由潮流数据确定, 即:

$$V_{ref} = V_{g0} + E_{fd0} / K_A \quad (12)$$

式中: V_{g0} 为稳态机端电压; E_{fd0} 为稳态励磁电压。

在单机单负荷系统中, 式(9)表明电压幅值和功角无关, 与动态电压过程较相关的电压-无功子系统表达式为:

$$\begin{cases} T'_{d0} \dot{E}'_q = E_{fd} - K_3 E'_q \\ T_A \dot{E}_{fd} = K_A V_{ref} - E_{fd} - K_A K_2 E'_q \end{cases} \quad (13)$$

式中: $K_3 = 1 + (1-u)(X_d - X') X_u / (R_L^2 + X_u^2)$ 为灵敏度系数。

对于稳态平衡点, 有:

$$\begin{cases} E_{fd} - K_3 E'_q = 0 \\ K_A (V_{ref} - K_2 E'_q) - E_{fd} = 0 \\ E'_q = \frac{K_A V_{ref}}{K_A K_2 + K_3} \\ E_{fd} = \frac{K_A K_3 V_{ref}}{K_A K_2 + K_3} \\ V_1 = \frac{K_A K_1 V_{ref}}{K_A K_2 + K_3} \end{cases} \quad (14)$$

单机单负荷系统的灵敏度系数 $K_1 - K_3$ 与减载比率 u 的关系如表 1 所示。

表 1 灵敏度系数与减载比率间的关系

Table 1 Relationship between sensitivity coefficient and load shedding ratio

$u / \%$	K_1	K_2	K_3
0	0.8052	0.8559	1.4619
10	0.8228	0.8692	1.4181
25	0.8501	0.8898	1.3506
50	0.8978	0.9254	1.2343
100	1.0000	1.0000	1.0000

根据表 1, 经过代数计算可知, 减载后状态变量 E'_q 、 E_{fd} 的稳定平衡点下降, 负荷节点电压幅值 V_1 上升。

在动态电压问题中, 除了需要讨论稳定平衡点外, 还需厘清电压在平衡点间的移动过程。对于单机单负荷系统而言, 假设 0.5 s 时切除部分负荷, 不同减载比率下的 E'_q 均具有典型响应, 如图 1 所示(图中纵轴为标么值, 后同)。

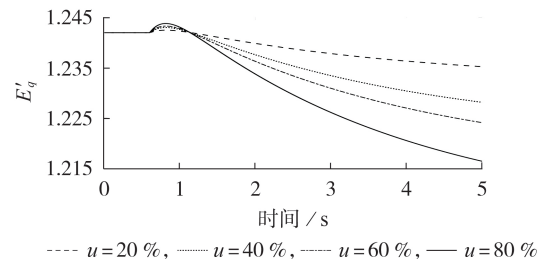


图 1 不同减载比率下 E'_q 的动态变化

Fig.1 Dynamic variation of E'_q under different load shedding ratios

根据式(9)可知: 在减载完成瞬间, K_1 增大导致 V_1 突增, 但由于后续 K_1 不再随时间变化, V_1 随时间变化趋势与 E'_q 相同, 电压的动态行为主要由 E'_q 决定, 即先增大再衰减至稳定点。

如果将 K_1 视为一种简单算子 $f_{K_1}(\cdot)$:

$$f_{K_1}(\cdot): E'_q \rightarrow V_1$$

则在算子 $f_{K_1}(\cdot)$ 的作用下,动态电压幅值的初始值、最大值以及稳态平衡值关于减载量均呈现单调关系,从而使不同减载量对应的 V_1 曲线具有保序特征,如图2所示。

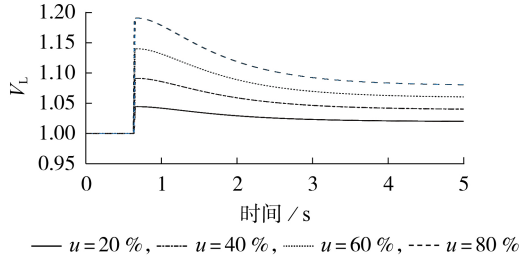


图2 减载不同比率感性负荷后的电压变化
Fig.2 Voltage variation after reducing different ratios of inductive load

2.3 基于单调控制理论的动态过程分析

根据式(6)输入-输出单调的判定条件,在 t 时刻不同输入量(减载比率为 u_1, u_2 ,且 $u_1 < u_2$)下,有:

$$h(t, \mathbf{x}_2, u_2) - h(t, \mathbf{x}_1, u_1) = \int_0^1 \sum_j \frac{\partial h}{\partial x^j} (x_2^j - x_1^j) dr + \int_0^1 \frac{\partial h}{\partial u} (u_2 - u_1) dr = (E'_{q2} - E'_{q1}) \int_0^1 \frac{\partial h}{\partial E'_q} dr + (u_2 - u_1) \int_0^1 \frac{\partial h}{\partial u} dr \quad (15)$$

式中: E'_{q1}, E'_{q2} 分别为减载比率 u_1, u_2 所对应的 q 轴暂态电动势。

式(15)的物理意义为,控制变量的动态作用等于状态变量在时间断面积分和控制变量在时间断面积分之和。

对于控制变量积分部分,低压减载对象是感性负荷,输入-输出灵敏度为正($\partial h / \partial u > 0$),由于减载量不随时间变化,且 $u_2 - u_1 > 0$,因此,随着时间增加,控制变量积分结果恒大于0。

对于状态变量积分部分, E'_q 表示同步机对系统电压的支撑作用,与系统电压正相关,即输入-状态灵敏度为正($\partial h / \partial E'_q = K_1 > 0$)。

进一步将 $E'_{q2} - E'_{q1}$ 在整个动态过程展开,根据文献[15]中关于状态变量初值差的公式:

$$\mathbf{x}(u_2, t) - \mathbf{x}(u_1, t) = \int_0^1 \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial u_{(0)}} [u_2 + r(u_1 - u_2)] (u_2 - u_1) dr \quad (16)$$

式中: $u_{(0)}$ 为控制变量初值。

假设控制变量属于凸集,由于 E'_q 连续可微,根据式(16)可以得到关于控制变量初值 $u_{(0)}$ 的积分表达式^①为:

$$E'_{q2}(u_2, t) - E'_{q1}(u_1, t) = \int_0^1 \frac{\partial E'_q}{\partial u_{(0)}} (u_2 - u_1) dr \quad (17)$$

将式(17)代入式(15)得到:

$$h(t, \mathbf{x}_2, u_2) - h(t, \mathbf{x}_1, u_1) = (u_2 - u_1) \left(\int_0^1 \frac{\partial E'_q}{\partial u_{(0)}} dr \int_0^1 \frac{\partial h}{\partial E'_q} dr + \int_0^1 \frac{\partial h}{\partial u} dr \right) \quad (18)$$

根据式(9)可知,状态灵敏度 $\partial h / \partial E'_q = K_1$,结合表1的结果有:

$$\frac{\partial h}{\partial E'_q} = K_1 \leq 1 \quad (19)$$

由于 $T'_{d0} = 5$ s, $T_A = 0.2$ s,可近似认为 $T'_{d0} \gg T_A$,即励磁电压 E'_{fd} 相对内电动势 E'_q 而言变化更快,可将电压无功子系统降阶处理为:

$$\begin{cases} T'_{d0} \dot{E}'_q = E'_{fd} - K_3 E'_q \\ 0 = K_A V_{ref} - E'_{fd} - K_A K_2 E'_q \end{cases} \quad (20)$$

即:

$$T'_{d0} \dot{E}'_q = K_A V_{ref} - (K_A K_2 + K_3) E'_q \quad (21)$$

参考文献[17]的推导, $\partial E'_q / \partial u_{(0)}$ 是式(22)所示初值问题的解。

$$\begin{cases} T'_{d0} \dot{p} = -(K_A K_2 + K_3) p - E'_q \left(K_A \frac{\partial K_2}{\partial u} + \frac{\partial K_3}{\partial u} \right) \\ p(0) = 0 \end{cases} \quad (22)$$

式中: $p = \partial E'_q / \partial u_{(0)}$; $p(0)$ 为 p 的初值。

将一阶微分方程稳态时取最小值,有:

$$\left(\frac{\partial E'_q}{\partial u_{(0)}} \right)_{\min} = - \frac{E'_q (K_A \partial K_2 / \partial u + \partial K_3 / \partial u)}{K_A K_2 + K_3} \quad (23)$$

为了进行保序比较,需要估计式(23)最小值结果,计算灵敏度系数 $K_1 - K_3$ 对减载比率 u 的偏导,结果如表2所示。

表2 灵敏度系数对减载比率的偏导
Table 2 Partial derivation of sensitivity coefficient to load shedding ratio

$u / \%$	$\partial K_1 / \partial u$	$\partial K_2 / \partial u$	$\partial K_3 / \partial u$
0	0.1745	0.1321	-0.4351
10	0.1784	0.1347	-0.4432
25	0.1854	0.1393	-0.4567
50	0.1963	0.1457	-0.4719
100	0.2098	0.1502	-0.4528

通过适当的放缩处理,可估计 $\partial E'_q / \partial u_{(0)}$ 的下界为:

$$\left(\frac{\partial E'_q}{\partial u_{(0)}} \right)_{\min} > - \frac{(K_A \partial K_2 / \partial u + \partial K_3 / \partial u)_{\max}}{(K_A K_2 + K_3)_{\min}} E'_q \approx -0.06 E'_q \quad (24)$$

且有:

①式(6)是针对时间断面函数的积分展开,偏导求取的对象是 \mathbf{x}, \mathbf{u} 等同一时间断面下的变量,涉及代数方程;式(16)是针对时域函数的积分展开,偏导求取的对象是输入变量初值 $u_{(0)}$,涉及系统微分代数方程。

$$\frac{\partial h}{\partial u} = \frac{\partial K_1}{\partial u} E'_q > 0.1745 E'_q \quad (25)$$

综合上述分析,可得:

$$\int_0^1 \frac{\partial h}{\partial u} dr + \int_0^1 \frac{\partial E'_q}{\partial u_{(0)}} dr \geq 0 \quad (26)$$

借助数值仿真,通过差分法计算 $\partial E'_q / \partial u_{(0)}$ 的变化曲线,如图3所示,可见,图中结果与式(24)估计结果相符。

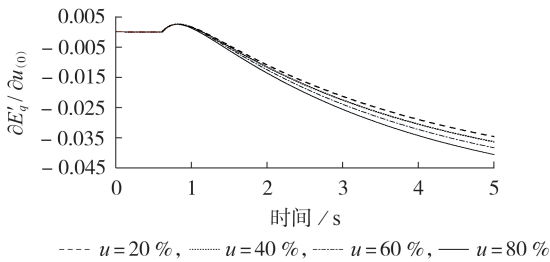


图3 不同减载比率下 $\partial E'_q / \partial u_{(0)}$ 的变化曲线

Fig.3 Variation curves of $\partial E'_q / \partial u_{(0)}$ under different load shedding ratios

根据式(19)和式(26),整理得到最终结果为:

$$h(t, \mathbf{x}_2, u_2) - h(t, \mathbf{x}_1, u_1) \geq (u_2 - u_1) \left(\int_0^1 \frac{\partial E'_q}{\partial u_{(0)}} dr + \int_0^1 \frac{\partial h}{\partial u} dr \right) > 0 \quad (27)$$

式(27)表明,动态电压的时域变化趋势由状态分量的动态决定,但不同控制参数对应动态曲线间的保序特征主要取决于控制分量间的单调关系。在实际工程应用中,往往借助减载后平衡点的单调性即可判断动态曲线间的保序性,这是由系统的单调控制特性所决定的。

2.4 多机系统

对于多机系统,系统微分方程将拓展成矩阵形式:

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega_s (\omega - e) \\ M \dot{\omega} = P_M - P_e \\ T'_{d0} \dot{E}'_q = E_{fd} - E'_q - K_1 E'_q \\ T_A \dot{E}_{fd} = K_A V_{ref} - E_{fd} - K_A V_G \end{cases} \quad (28)$$

式中: e 为元素全为1的 n 维列向量; V_G 为 V_g 的矩阵形式;其他变量为相应变量的矩阵形式。

对于代数方程部分, u 为低压过载节点切负荷比率, y 为任一负荷节点电压。假设负荷采用恒阻抗模型,可以将其等值导纳并入网络的节点导纳矩阵中,得到系统的代数方程为:

$$\begin{bmatrix} Y_{GC} & Y_{CL} \\ Y_{LG} & Y_{LL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_G \\ V_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_G \\ 0 \end{bmatrix} \quad (29)$$

式中: Y 为系统节点导纳矩阵; V 、 I 分别为节点电压和电流向量;下标 G、L 分别表示发电机和负荷节点。对于恒电流等静态负荷模型,参考文献[18]进行类似处理。

进一步地,假设同步机采用经典模型,将暂态电抗 X' 并入导纳矩阵中,可以得到改进后的系统网络方程为:

$$\begin{bmatrix} Y'_{GC} & Y'_{CL} \\ Y'_{LG} & Y'_{LL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E'_q \\ V_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_G \\ 0 \end{bmatrix} \quad (30)$$

式中: Y' 为改进后的系统节点导纳矩阵。

分块展开后可得到负荷节点电压 V_L 关于同步机内电动势 E'_q 的表达式为:

$$V_L = -(Y'_{LL})^{-1} Y'_{LG} E'_q \quad (31)$$

令 $W = -(Y'_{LL})^{-1} Y'_{LG}$, 该矩阵元素为 W_{ij} , 则任一负荷节点 i 电压幅值 V_{Li} 满足:

$$V_{Li} = \sum_{j=1}^{N_g} W_{ij} E'_{qj} \quad (32)$$

式中: N_g 为同步机数量; E'_{qj} 为第 j 台同步机的 q 轴暂态电势。

将式(32)实部与虚部分离后,即可求取负荷节点 i 电压幅值 V_{Li} 关于同步机内电动势大小 E'_{qj} 的偏导关系。

将上述假设和分析应用于39节点标准系统中,计算各负荷节点电压幅值关于不同同步机内电动势的偏导和,结果如附录A图A3所示。由图可见,不同负荷节点电压幅值关于不同同步机内电动势的偏导和始终小于1,该特征反映了网络方程的基本特征。

由上述偏导和的计算结论可得:

$$\sum_{j=1}^{N_g} \frac{\partial h}{\partial E'_{qj}} = \sum_{j=1}^{N_g} \frac{\partial V_{Li}}{\partial E'_{qj}} \leq 1 \quad (33)$$

考虑功角变化不大的假设条件,得到多机输入-输出判定条件为:

$$h(t, \mathbf{x}_2, u_2) - h(t, \mathbf{x}_1, u_1) \approx \sum_{i=1}^{N_g} (E'_{q2} - E'_{q1}) \int_0^1 \frac{\partial h}{\partial E'_{qi}} dr + (u_2 - u_1) \int_0^1 \frac{\partial h}{\partial u} dr \quad (34)$$

式中: E'_{qi} 为第 i 台同步机的 q 轴暂态电势; E'_{q1} 、 E'_{q2} 分别为切负荷比率 u_1 、 u_2 对应的第 i 台同步机的 q 轴暂态电势。

根据式(33)以及2.3节推导过程,将式(34)简化为:

$$\begin{aligned} h(t, \mathbf{x}_2, u_2) - h(t, \mathbf{x}_1, u_1) &\approx (u_2 - u_1) \left(\sum_{i=1}^{N_g} \int_0^1 \frac{\partial h}{\partial E'_{qi}} dr \int_0^1 \frac{\partial E'_{qi}}{\partial u_{(0)}} dr + \int_0^1 \frac{\partial h}{\partial u} dr \right) \geq \\ &(u_2 - u_1) \left(\left(\int_0^1 \frac{\partial E'_{qi}}{\partial u_{(0)}} dr \right)_{\min} \int_0^1 \sum_{i=1}^{N_g} \frac{\partial h}{\partial E'_{qi}} dr + \int_0^1 \frac{\partial h}{\partial u} dr \right) \geq \\ &(u_2 - u_1) \left(\left(\int_0^1 \frac{\partial E'_{qi}}{\partial u_{(0)}} dr \right)_{\min} + \int_0^1 \frac{\partial h}{\partial u} dr \right) \end{aligned} \quad (35)$$

不同于单机单负荷系统,多机系统难以得到简洁的偏导解析表达式,需要借助数值计算结果辅助说明电压动态过程的单调控制特性。

采用2.1节假设条件2)中的仿真算例,通过差分法数值计算不同减载比率下 $\partial E_q^i/\partial u_{(0)}$ 的最小值,通常最小值对应电气距离最近的同步机内电动势。图4为不同减载比率下 $\partial E_q^i/\partial u_{(0)}$ 的变化曲线。

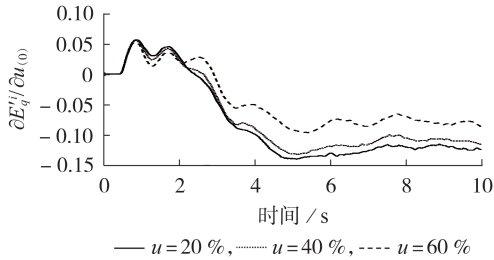


图4 不同减载比率下 $\partial E_q^i/\partial u_{(0)}$ 的变化曲线

Fig.4 Variation curves of $\partial E_q^i/\partial u_{(0)}$ under different load shedding ratios

在0 s,减载比率为20%、40%、60%时的偏导 $\partial h/\partial u$ 分别为0.19、0.18、0.16。其中,减载比率为20%时,类似单机单负荷系统,可推导出结论式(25)。不同时刻多机系统的控制分量也会受到 E_q^i 变化的影响。以图1中距离减载点最近的同步机34为例,在减载动作后, E_q^i 偏差比率仅为6.4%,在大规模电网中减载对 E_q^i 影响会更小,因此,整体而言, E_q^i 变化对控制分量影响并不大,可近似将 $\partial h/\partial u$ 视为恒定,进而可得到:

$$\left(\int_0^1 \frac{\partial E_q^i}{\partial u^{(0)}} dr \right)_{\min} + \int_0^1 \frac{\partial h}{\partial u} dr > 0 \quad (36)$$

将式(36)代入输入-输出判定条件式(35)中,即可证明上述多机减载过程的单调控制特性。

3 新能源故障恢复期间的单调控制现象

近年来,新能源有功恢复速率受到了学者的广泛关注^[19],现有研究主要关注恢复速率对暂态稳定的影响,而较少考虑有功恢复速率对动态电压的影响。

3.1 新能源故障恢复模型

根据机电暂态仿真软件PSD-BPA用户手册^[20],附录A表A1归纳了新能源机组在故障恢复期间的主要控制方式。在故障切除后,电压快速恢复至稳态值附近,不再需要额外的无功电压支撑,因此通常采用无功立即恢复初值(一般为0)的无功控制方式。对于有功恢复过程,为了防止大量有功突变引发电气量振荡,厂家会限制机组功率爬坡速率以保护设备,通常采用定斜率上升的有功控制方式。总体而言,由于新能源响应速度快,在机电暂态分析,尤其是故障恢复期间,需要更加关注其功率外特性。

仿真上述典型控制方式下光伏故障及故障恢复期间的有功、无功曲线,如附录A图A4所示。故障清除后,有功和无功仅在0.8 s后就进入了恢复期间控制方式,仿真结果中有功、无功外特性与指定控制方式一致,由此可见,可以将新能源故障恢复过程简化为功率注入模型,关注动态过程的功率外特性。

3.2 拓展2节点系统

考虑新能源(风机或光伏)接入场景,在附录A图A2负荷所连母线处增加1台新能源机组,得到拓展2节点系统,如附录A图A5所示。其中同步机同样采用三阶模型,配置比例型励磁电压调节器,负荷采用静态恒阻抗模型。

根据本文假设,故障恢复期间新能源无功立即恢复到稳态值,有功 P_{PV} 采用定斜率爬坡的方式恢复,将有功恢复速率作为 u ,得到系统微分方程为:

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega_s(\omega - 1) \\ M\dot{\omega} = P_M - P_e \\ T'_{d0}\dot{E}'_q = E_{fd} - E'_q - K_1 E'_q \\ T_A\dot{E}_{fd} = K_A V_{ref} - E_{fd} - K_A V_g \\ \dot{P}_{PV} = u \end{cases} \quad (37)$$

根据输入-输出单调的判定条件,不同有功恢复速率 $u_1, u_2 (u_1 < u_2)$ 下的电压差可以表示为:

$$h(\mathbf{x}_2, u_2) - h(\mathbf{x}_1, u_1) = \int_0^1 \sum_j \frac{\partial h}{\partial x^j} (x_2^j - x_1^j) dr \approx \int_0^1 \left[\frac{\partial h}{\partial E'_q} (E'_{q2} - E'_{q1}) + \frac{\partial h}{\partial P_{PV}} (P_{PV2} - P_{PV1}) \right] dr \quad (38)$$

由于有功与其他状态变量间无耦合关系,假设所关注的时间断面下有功恢复时间为 τ ,式(38)可进一步简化为:

$$h(\mathbf{x}_2, u_2) - h(\mathbf{x}_1, u_1) = \int_0^1 \left[\frac{\partial h}{\partial E'_q} (E'_{q2} - E'_{q1}) + \frac{\partial h}{\partial P_{PV}} (u_2 - u_1) \tau \right] dr \quad (39)$$

假设动态过程中电压幅值对 P_{PV} 的偏导符号恒定,根据上述模型并参考3.2节的推导过程,可以对动态过程中的输入-输出单调特征进行证明,同理可以拓展到多机新能源系统的推导,此处不再赘述。

4 算例分析

4.1 切除容性负荷后电压的动态变化过程

本节假设稳态接入的负荷呈容性,设置有功为80 MW,功率因数为-0.8,切除不同比率容性负荷后的动态电压波形对比如附录A图A6所示。由图可知,当负荷是容性负荷时,切负荷动作可能会使动态电压曲线呈现相反的变化趋势,但动态电压关于负荷减载比率仍具有单调关系,不同负荷减载比率对应的动态曲线保序且不交错。

4.2 暂态电压失稳过程的防控

4.2.1 10机39节点系统

系统参数设置参考2.1节假设条件2),负荷采用静态模型,同步机采用三阶模型,并配置比例型励磁电压调节器,励磁参数均为 $T_A=0.02\text{ s}$ 、 $K_A=20$ 。设置2种故障:故障1,第5个周期线路5-8发生三相接地短路故障,第15个周期切除故障线路;故障2,第5个周期线路4-11发生三相接地短路故障,第15个周期切除故障线路。

切负荷除了可有效解决静态电压问题外,还可用于暂态电压失稳防控。对于上述故障,分别在故障清除5个周期后切除节点8上的部分负荷,节点8的电压变化如图5所示(图中电压为标么值,后同)。

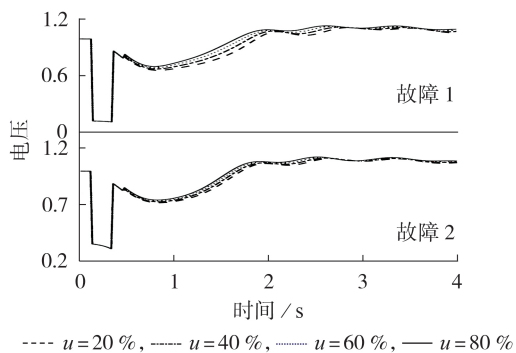


图5 不同减载比率对暂态电压的影响(10机39节点系统)

Fig.5 Influence of different load shedding ratios on transient voltage(10-generator 39-bus system)

进一步考虑投入并联电容器来提高暂态电压稳定性,对于故障1,故障清除5个周期后在节点8投入不同容量的并联电容器,节点8暂态电压波形如附录A图A7所示。

对于切负荷和投入并联电容器2种防控措施,故障切除后的短期(0~1 s)内,动态电压与减载比率具有输入-输出单调性,尤其是在采用投入并联电容器的措施时,单调保序特性在后续阶段也持续存在。但对于切负荷的防控措施,随着电压恢复至正常值,励磁调压输出量减小,功角变化的非线性因素主导电压变化,在3 s左右,曲线间的保序关系不再满足,单调关系被打破,其原因还有待进一步探究。

4.2.2 某区域电网

在强电网中,大扰动后的同步机功角变化不大,单调特性保持的时间更长。以某区域电网为算例展开分析,该区域电网的拓扑结构如附录A图A8所示。设置500 kV从博双回线中的一回线在从西侧发生金属性接地故障,5个周期后线路双跳隔离故障,木棉地区暂态电压无法恢复。通过切负荷的防控措施使木棉地区暂态电压恢复,选取电压最低节点附近负荷区域为减载区域,不同负荷减载比率对应的木棉地区节点最低电压曲线如图6所示。由图

可知,在强电网中,电力系统动态电压的单调控制特性更为显著。

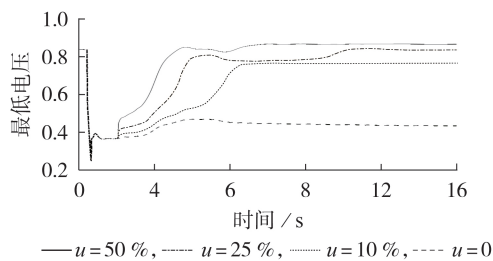


图6 不同减载比率对暂态电压的影响(某区域电网)

Fig.6 Influence of different load shedding ratios on transient voltage(regional power grid)

4.3 新能源故障恢复期间的动态电压变化

4.3.1 拓展2节点系统

考虑附录A图A5所示的新能源接入后的拓展2节点系统,同步机参数设置同4.1节,新能源机组容量为40 MW,故障恢复期间新能源机组不输出无功。在实际运行的过程中,新能源电站中的新能源机组一般是逐一并网的^[19],为了模拟该情况,在故障恢复期间,通过小阶梯拟合而成的斜坡模拟新能源电站的功率恢复过程,如附录A图A9所示。

设置稳态时负荷有功为80 MW,感性无功为60 Mvar,以此模拟新能源接入受端电网的情况。假设故障恢复期间的母线电压初始值为1 p.u.,在80、40、20 MW/s这3种有功恢复速率下,新能源出力完全恢复分别需要0.5、1、2 s,故障恢复期间新能源出口动态电压变化曲线如图7上图所示。同理,设定稳态时负荷有功为-80 MW,感性无功为60 Mvar,以此模拟新能源接入送端电网的情况,不同有功恢复速率下新能源出口动态电压变化曲线如图7下图所示。

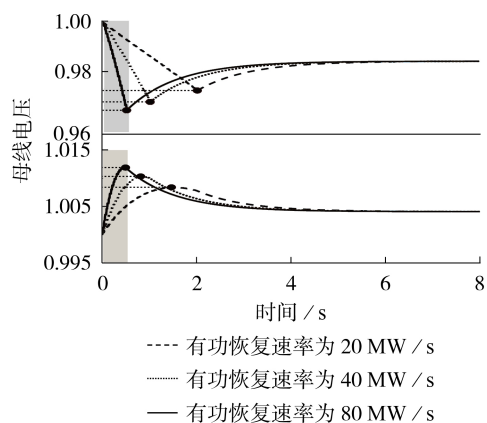


图7 不同有功恢复速率对受端暂态电压的影响

Fig.7 Influence of different active power recovery rates on transient voltage of receiving end

由图7中的阴影部分可见,在有功恢复期间,3种不同有功恢复速率对应的动态电压曲线具有单调

保序特性,此外,不同的有功恢复速率与相应的最高/最低动态电压间同样呈现出明显的单调关系。

通过仿真与分析可知,如果有功恢复速率参数设置不当,则将会引发系列电压问题,例如:如果送端新能源有功恢复过快,则可能会导致电压超过最低阈值,进而导致控制策略切换,使得新能源机组再次进入低电压控制模式;如果受端新能源有功恢复过快,则可能会导致机组过电压脱网等潜在问题。

4.3.2 某区域电网

以某区域送端高比例新能源电网为例,分析新能源有功恢复速率对动态电压的影响,该区域电网拓扑结构如附录A图A10所示。该区域大量光伏和风电通过威宁变汇集输出,假设光伏、风电低电压穿越控制模型相同,有功采用定斜率的恢复方式,不同机组的有功功率从0恢复至稳态值均需要10s。设置在第5个周期威宁—高峰送出线路发生三相接地短路故障,在第11个周期,线路单线断开切除故障。仙水窝光伏母线动态电压变化如图8上图所示,仿真结果与拓展2节点系统相符。对于高比例新能源送端电网而言,在有功恢复的过程中动态电压会呈现下降趋势,进而使新能源机组再次进入低电压穿越状态,并不断重复上述现象,借助单调控制理论,将故障恢复期间有功恢复速率减半后,再次仿真发现反复低电压穿越现象消失,如图8下图所示。

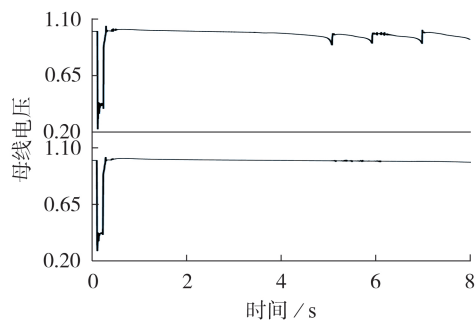


图8 故障恢复期间反复低电压穿越及改善后的电压波形
Fig.8 Repeated low voltage ride through and improved voltage curves during fault recovery

此外,传统电网有功的快速恢复主要有助于提升系统的频率稳定性,在一定程度上忽略了有功对电压的影响。随着高比例电力电子设备和新能源的接入,电网对电压愈发敏感,传统频率、电压间的弱耦合假设在部分场合不再适用,需要进行更为精细的分析研究。

5 结论

单调控制理论有助于理解电力系统中的诸多动态电压控制策略,在数学层面提升对动态电压问题的认识。本文论证了低压减载和新能源故障恢复2种场景下输入、输出变量间的单调控制关系,为传统

控制设计提供了理论支撑,对潜在的动态电压问题进行了预判。

本文提出的分析方法不局限于动态电压的研究,具有较强的普适性。后续研究将借助单调控制特性提出更为具体的控制优化方法,进一步挖掘单调控制理论在电网中的更多应用场景。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 刘蔚,赵勇,苏寅生,等. 电力系统低压减载配置和整定方法综述[J]. 南方电网技术,2015,9(2):36-43.
LIU Wei,ZHAO Yong,SU Yinsheng,et al. Review on configuration and setting methods of under voltage load shedding of power systems[J]. Southern Power System Technology,2015,9(2):36-43.
- [2] 崔晓丹,吴家龙,雷鸣,等. 新能源高占比电力系统的连锁故障诱因及事故链搜索技术探讨[J]. 电力自动化设备,2021,41(7):135-143.
CUI Xiaodan,WU Jialong,LEI Ming,et al. Discussion on inducement and fault chain search technology of cascading failure in power system with high penetration of renewable energy[J]. Electric Power Automation Equipment,2021,41(7):135-143.
- [3] 邱威,贺静波,于钊,等. 特高压直流馈入湖南电网的暂态电压稳定分析[J]. 电力自动化设备,2019,39(10):168-173.
QIU Wei,HE Jingbo,YU Zhao,et al. Transient voltage stability analysis of Hunan Power Grid with infeed UHVDC[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(10):168-173.
- [4] 陈磊,闵勇. 考虑暂态电压跌落限制的直接法暂态稳定分析[J]. 电力系统自动化,2006,30(21):6-10.
CHEN Lei,MIN Yong. Transient stability analysis of power systems by direct method considering transient voltage dip[J]. Automation of Electric Power Systems,2006,30(21):6-10.
- [5] 朱凌志,周双喜. 电压稳定分析的潮流算法研究[J]. 电力系统自动化,2000,24(5):1-4,58.
ZHU Lingzhi,ZHOU Shuangxi. Study on power flow arithmetic for voltage stability analysis[J]. Automation of Electric Power Systems,2000,24(5):1-4,58.
- [6] 徐伟,李群,杨君军,等. 基于综合贡献度指标的紧急减负荷控制多目标优化方法[J]. 电力自动化设备,2018,38(8):189-194.
XU Wei,LI Qun,YANG Junjun,et al. Multi-objective optimization method for emergency load shedding based on comprehensive contribution index[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(8):189-194.
- [7] LAUFENBERG M J,PAI M A. A new approach to dynamic security assessment using trajectory sensitivities[J]. IEEE Transactions on Power Systems,1998,13(3):953-958.
- [8] HISKENS I A,ALSEDDIQUI J. Sensitivity, approximation, and uncertainty in power system dynamic simulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2006,21(4):1808-1820.
- [9] 童礼系,方万良. 解决电压延迟恢复问题的动态无功规划方法研究[J]. 陕西电力,2012,40(8):10-15.
TONG Lixi,FANG Wanliang. Dynamic VAR planning method for mitigating fault-induced delayed voltage recovery problems[J]. Shaanxi Electric Power,2012,40(8):10-15.
- [10] 李顺,廖清芬,刘涤尘,等. 计及电压稳定的自适应协调低频减载策略[J]. 电力自动化设备,2017,37(12):157-163.
LI Shun,LIAO Qingfen,LIU Dichen,et al. Adaptive coordinated low frequency load shedding strategy considering voltage sta-

- bility[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(12): 157-163.
- [11] 陈民权,甘德强,康卓然,等. 电力系统机电暂态的混合单调特性[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(20): 37-45.
CHEN Minquan, GAN Deqiang, KANG Zhuoran, et al. Mixed monotonicity characteristic of electromechanical transient in power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(20): 37-45.
- [12] HIRSH M W. Systems of differential equations that are competitive or cooperative I: limit sets[J]. SIAM Journal on Mathematical Analysis, 1985, 13(2): 167-179.
- [13] SMITH H L. Monotone dynamical systems: reflections on new advances & applications[J]. Discrete & Continuous Dynamical Systems-A, 2017, 37(1): 485-504.
- [14] ANGELI D, SONTAG E D. Monotone control systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2003, 48(10): 1684-1698.
- [15] SMITH H. Monotone dynamical systems: an introduction to the theory of competitive and cooperative Systems[M]. Providence, Rhode Island: American Mathematical Society, 2008.
- [16] 周双喜,朱凌志,郭锡玖,等. 电力系统电压稳定性及其控制[M]. 北京:中国电力出版社, 2004: 436.
- [17] 尤秉礼. 常微分方程补充教程[M]. 北京:人民教育出版社, 1981: 72.
- [18] 康卓然. 电力系统暂态稳定的近似解析解研究[D]. 杭州:浙江大学, 2020.
- KANG Zhuoran. Research on approximate analytical solution of power system transient stability[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
- [19] 于珍,沈沉,张雪敏. 双馈风机故障穿越后功率恢复速率对系统暂态稳定的影响分析[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(13): 3781-3791, 4019.
- YU Zhen, SHEN Chen, ZHANG Xuemin. Analysis on the impact of post-fault power recovery speed of doubly-fed induction generators on power system transient stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(13): 3781-3791, 4019.
- [20] 中国电力科学院系统所. PSD-ST暂态稳定程序用户手册 5.7[M]. 北京:中国电力科学院, 2020: 288-291.

作者简介:



张 谦

张 谦(1997—),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统稳定分析与控制(E-mail: zhangqianleo@zju.edu.cn);

陈民权(1995—),男,博士研究生,主要研究方向为电力系统稳定分析与控制(E-mail: ee_cmq@zju.edu.cn);

甘德强(1966—),男,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统稳定分析与控制(E-mail: dgan@zju.edu.cn)。

(编辑 王锦秀)

Monotone control characteristics of dynamic voltage in power system

ZHANG Qian¹, CHEN Minquan¹, HAO Wenqing¹, LI Zhenyao¹, GAN Deqiang¹, FAN Xiang²

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Power Dispatching Control Center of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550002, China)

Abstract: The connection of high proportion of renewable energy and power electronic equipments makes the current power grid more sensitive to the change of dynamic voltage. The monotone control system theory is applied to the dynamic voltage problem, the determinant condition for input-output monotone is proposed, and it is point out that the monotone control characteristics is existed in dynamic voltage process. With the help of this theory, the monotone characteristics between low voltage load shedding control and dynamic voltage in different scale AC systems are demonstrated, which is verified in single system and regional power grid. For the power system connected with renewable energy, its dynamic voltage model during fault recovery period is simplified. On the basis of demonstrating its monotone control characteristics, the potential repeated low voltage ride through problem is predicted, and the problem is simulated in an actual sending end power grid with renewable energies, which verifies the effectiveness of the proposed improvement strategy.

Key words: electric power systems; dynamic voltage; monotone control; low voltage load shedding; prevention control; fault recovery

附录 A:

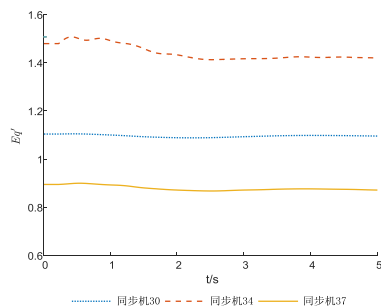


图 A1 切负荷后同步机内电动势变化对比

Fig.A1 Comparison of internal potential variation of synchronous generator after load shedding

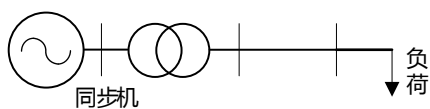


图 A2 单机单负荷系统示意图

Fig.A2 Schematic diagram of single generator single load system

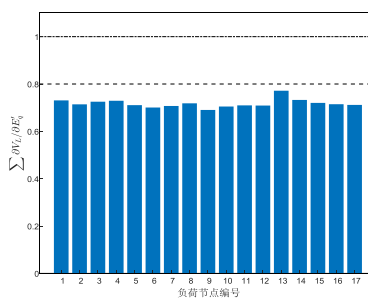


图 A3 负荷节点电压对不同同步机内电动势的偏导和

Fig.A3 Sum of partial derivation of load bus voltage to internal potential of different synchronous generators

表 A1 故障恢复期间新能源机组控制方式

Table A1 Control mode of renewable energy generator during fault recovery

有功控制方式	无功控制方式
立即恢复	立即恢复初值
定斜率上升	保持定值一段时间
抛物线上升	指数形式下降
定时间斜率上升	斜线形式下降

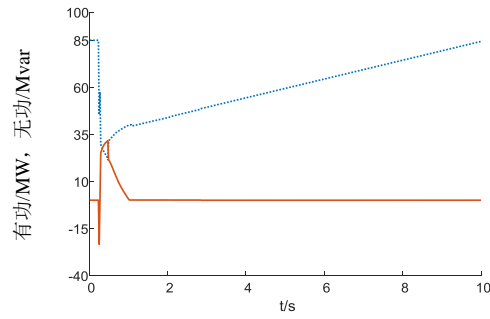


图 A4 故障及恢复期间光伏典型有功、无功曲线

Fig.A4 Typical active and reactive power curves of PV during fault and fault recovery period

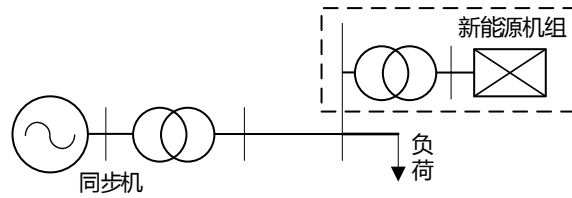


图 A5 考虑新能源接入的 2 节点系统

Fig.A5 Two-bus system considering connection of renewable energy

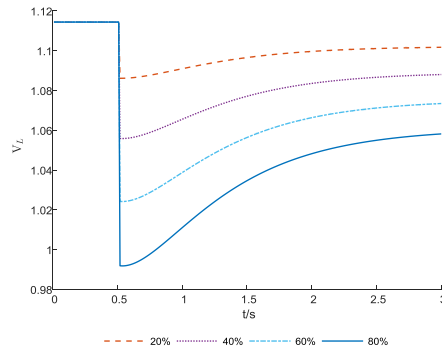


图 A6 切除不同比率容性负荷后的电压变化

Fig.A6 Voltage variation after reducing different ratios of capacitive load

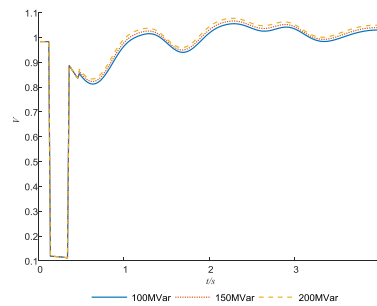


图 A7 投入不同比率并联电容器对暂态电压的影响 (10 机 39 节点系统)

Fig.A7 Influence of putting in different ratios of shunt capacitor on transient voltage (10-generator 39-bus system)

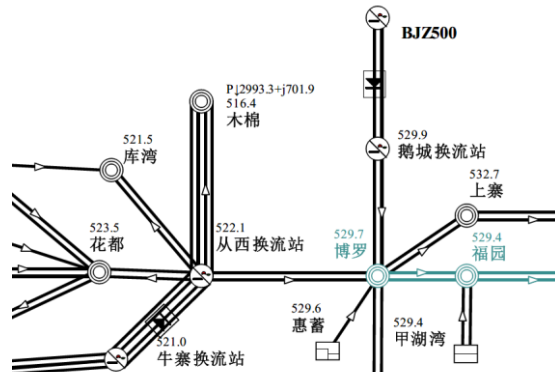


图 A8 某区域电网拓扑结构

Fig.A8 Topological structure of regional power grid

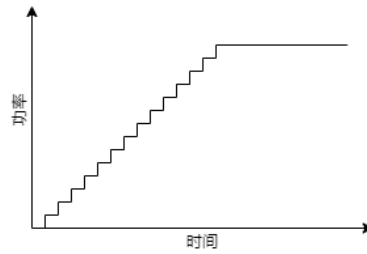


图 A9 新能源电站故障恢复期间功率示意图

Fig.A9 Schematic diagram of power of renewable energy station during fault recovery

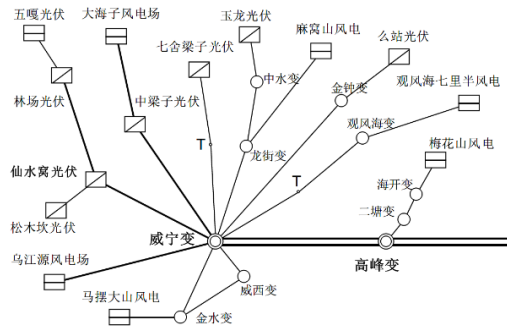


图 A10 某区域电网拓扑结构

Fig.A10 Topological structure of regional power grid