李子恒1,王 康1,李 琦1,李 立1,辛焕海2

(1. 国网陕西省电力有限公司,陕西 西安 710048;2. 浙江大学 电气工程学院,浙江 杭州 310027)

摘要:针对感应电机类动态负荷引起的暂态电压稳定问题,提出了一种基于转速-电压坐标平面的暂态电压 稳定问题的分析方法,描述了感应电机类动态负荷在转速-电压坐标平面上的稳定边界。通过转速-电压坐 标平面上电机运行点与稳定边界间的关系,可直观判断感应电机的加减速状态,并可清晰地解释感应电机类 动态负荷在受到扰动后的暂态过程中引发电压失稳的机理。通过对比感应电机在转速-电压坐标平面上的 工作点与所提的稳定边界间的关系,可以判断系统是否会出现电压失稳。通过单机无穷大系统及两区四机 系统的仿真算例验证了所提分析方法的有效性。

关键词:暂态电压稳定;稳定边界;感应电机;稳定分析;转速-电压坐标平面 **中图分类号:**TM 712 **文献标志码:**A DOI:10.16081/j.epae.202204054

0 引言

随着我国电力系统的发展,电网高度互联、电力 远距离和大规模输送已成为常态。同时,随着电力 系统规模及复杂程度的提高,电力系统的暂态电压 稳定问题也变得日益复杂^[14]。明确暂态电压稳定 问题的出现机理、提出有效的暂态电压稳定问题分 析方法对于分析和提高系统暂态电压稳定性具有重 要意义。

一般认为暂态电压稳定问题与系统受扰动后负 荷等元件的动态特性有关,而以感应电机为代表的 动态负荷是影响系统暂态电压稳定的关键因素[5-6]。 众多学者早已指出暂态电压稳定分析应考虑电机的 机电暂态过程[7-8]。文献[9-10]指出了暂态电压稳定 问题与故障切除时间密切相关,提出了临界切除时 间的概念和用于时域仿真的暂态电压稳定判据。文 献[11-12]分析了故障切除时间对电压稳定性的影 响,并提出了极限切除时间的计算方法。但极限切 除时间无法反映暂态电压失稳的根本原因,且受到 电机的负载转矩和转动惯量的影响。文献[13]分析 了电网参数对系统暂态电压稳定的影响,文献[14] 分析了感应电机负荷参数对暂态电压稳定的影响, 但二者对于暂态电压失稳机理缺乏深入的分析。文 献[15]提出了利用负荷节点的P-V曲线与感应电机 机械特性曲线进行暂态电压稳定分析的方法。文献 [16]指出暂态电压失稳的稳定边界不位于暂态P-V 曲线的顶点,并在P-V平面重新描述了稳定边界,但 基于P-V平面的分析无法直观反映感应电机自身的

收稿日期:2021-07-28;修回日期:2021-11-20

在线出版日期:2022-04-19

基金项目:国家电网公司科技项目(4000-202255071A-1-1-ZN) Project supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(4000-202255071A-1-1-ZN) 动态与电压失稳间的关系。文献[17]将感应电机类 负荷以有功、无功功率作为激励,以设备内电势幅值 和相角作为响应进行建模,并从异步电动机的幅相 运动角度解释电压失稳机理,为暂态电压稳定问题 提供了一种新的分析思路,但对于失稳判据及系统 的暂态电压稳定边界缺乏详细的分析。

为了更直观地从感应电机作为动态旋转元件的 物理本质着手分析此类负荷接入电网的电压稳定问 题,本文提出了基于转速-电压坐标平面(ω-V平面) 的暂态电压稳定性分析方法,描述了感应电机负荷 在ω-V平面上的稳定边界。通过分析ω-V平面上电 机ω-V曲线与稳定边界的交点,即系统的平衡点来 判断系统是否具有电压失稳的可能。进一步地,通 过对比系统受到扰动后感应电机在ω-V平面上的运 行点与稳定边界间的关系,可直观判断系统是否会 发生电压失稳。最后,本文利用单机无穷大系统及 两区四机系统的仿真算例验证了所提稳定分析方法 的有效性。

1 感应电机类动态负荷模型

1.1 感应电机的动态模型

在 dq 坐标系下, 感应电机电气部分的动态模型 可表示为式(1)—(3)^[18]。

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{\mathrm{d}\varphi_{ds}}{\mathrm{d}t} - \omega_0 \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{\mathrm{d}\varphi_{qs}}{\mathrm{d}t} + \omega_0 \varphi_{ds} \end{cases}$$

$$\begin{cases} V_{dr}' = R_r' i_{dr}' + \frac{\mathrm{d}\varphi'_{dr}}{\mathrm{d}t} - (\omega_0 - \omega_r) \varphi'_{qr} \\ V_{qr}' = R_r' i_{qr}' + \frac{\mathrm{d}\varphi'_{qr}}{\mathrm{d}t} + (\omega_0 - \omega_r) \varphi'_{dr} \end{cases}$$

$$(1)$$

$$T_{\rm e} = 1.5 p_{\rm f} (\varphi_{\rm ds} i_{\rm qs} - \varphi_{\rm qs} i_{\rm ds}) \tag{3}$$

式中:上标"'"表示转子侧相关变量已折算至定子

侧; V_{ds} 、 V_{qs} 和 V'_{dr} 、 V'_{qr} 分别为定子和转子 $d_{\chi}q$ 轴端电 压; i_{ds} 、 i_{qs} 和 i'_{dr} 、 i'_{qr} 分别为定子和转子 $d_{\chi}q$ 轴电流; R_{s} 、 R'_{r} 分别为定子和转子绕组电阻; p_{f} 为电机极对数; ω_{0} 为参考系角速度; ω_{r} 为电角速度; T_{e} 为电磁转矩; φ_{ds} 、 φ_{qs} 和 φ'_{dr} 公别为定子和转子 $d_{\chi}q$ 轴磁链,其表达 式见文献[18]。

感应电机机械部分的动态模型可表示为:

$$J\beta = T_{\rm e} - F\omega_{\rm m} - T_{\rm m} \tag{4}$$

式中:J为感应电机的转动惯量; β 为感应电机的角 加速度; T_m 为机械转矩;F为摩擦系数; ω_m 为电机转 子的机械角速度。

1.2 感应电机的稳态模型

稳态下感应电机某相的T形等效电路如附录A 图 A1 所示。式(5)—(8) 描述了感应电机的稳态特 性,转子侧各变量已折算到定子侧^[18],其中电机等效 电路定子侧和转子侧的回路方程分别如式(5)和式 (6)所示。

$$V_{\rm ms} = R_{\rm s} I_{\rm s} + j X_{\rm s} I_{\rm s} + j X_{\rm m} (I_{\rm s} + I_{\rm r}')$$
(5)

$$V_{\rm mr}' = \frac{K_r'}{S} I_r' + j X_r' I_r' + j X_m (I_s + I_r')$$
(6)

式中: V_{ms} 、 V'_{mr} 分别为定子和转子电压; I_{s} 、 I'_{r} 分别为定 子和转子电流; X_{s} 、 X'_{r} 和 R_{s} 、 R'_{r} 分别为定子和转子漏 抗、电阻; X_{m} 为励磁电抗;S为转差率。

对于一个三相感应电机,其电磁转矩具体如式 (7)所示。

$$T_{\rm e} = 3I_{\rm r}^{\prime 2} R_{\rm r}^{\prime} (1 - S) / (S\omega_{\rm m})$$
⁽⁷⁾

式中:*I*, 为转子电流有效值。稳态下感应电机转子的机械角速度ω_m如式(8)所示。

$$\omega_{\rm m} = 2\pi f (1-S) \frac{2}{p_{\rm f}} \tag{8}$$

式中:f为定子所施加电源的频率。

2 系统的功率特性及电机加速特性

由于感应电机类负荷机械动态与电磁动态相 比,往往具有更慢的动态特性,且本文更关注感应电 机类负荷自身动态特性对电压的影响,所以为简化 分析,在分析含感应电机类负荷系统的电压稳定边 界及电机自身的加减速特性时,采用感应电机的稳 态模型,而在算例验证时采用感应电机的详细模型。 下文算例将验证简化分析后结论的有效性。

2.1 感应电机的转矩差曲面及其加减速特性

由式(7)和式(8)可得,感应电机所能提供的电磁转矩如式(9)所示。

$$T_{\rm e} = 3 \frac{p_{\rm f}}{2} \frac{R_{\rm r}'}{S\omega_{\rm s}} I_{\rm r}'^2$$
 (9)

式中:ω,为定子角频率。

假设感应电机的负载转矩由两部分组成:一部 分和电机转速的平方成正比;另一部分为恒定转矩。 则电机的负载转矩可以表示为式(10)。值得注意的 是,机械转矩具体表达式并不影响本文所提方法的 适用性。

$$T_{\rm m} = (1 - \alpha) K \omega_{\rm m}^2 + \alpha T_{\rm const}$$
 (10)

式中:*T*_{const}为恒定转矩的负载转矩;α为恒定转矩负载所占比例;*K*为与电机转速的平方成正比的负载转矩和转速的平方的比例系数。

由式(4)可知,感应电机的角加速度β可以表示 为式(11)。

$$\beta = \frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} = \frac{T_{\mathrm{e}} - T_{\mathrm{m}}}{J} \tag{11}$$

记 $T_e - T_m = \Delta T$,因为对于某电机,其转动惯量通常为正且恒定,因此当 ΔT 大于0时,电机将加速转动,反之电机将减速转动。

电机稳态运行时,由附录A图A1可知,其阻抗可由转速确定。当端电压确定后即可计算得到电机的功率、转矩、电流等其他物理量。因此可将电机端电压V和电机的转速 ω 看作是引起电机转矩、电流等变化的自变量。分别以 ω 和V作为坐标系的x轴和y轴,将电机转矩差 ΔT 作为z轴,即可得到体现电机加减速特性的V- ω - ΔT 空间转矩差曲面。以附录A表A1所示的电机参数为例,其转矩差曲面如附录A图A2所示,图中平面表示 ΔT =0。若无特殊说明,后文图中数值均为标幺值。

2.2 系统中感应电机的功率特性曲线

由于本文重点关注暂态过程中感应电机自身动态特性对电压稳定的影响,因此,不失一般性地对外部系统进行简化^[16-17],将感应电机所接入的电网采 用戴维南等效电路进行等值。当感应电机接入系统 后,电机的端电压可表示为关于电源电压及各参数 的函数。对于附录A图A3所示的单机无穷大系统, 感应电机端电压V_m可表示为式(12)。

 $V_{\rm m} = f(V_{\rm s}, Z_{\rm s}, Z_{\rm line}, Z_{\rm T}, Z_{\rm load}, Z_{\rm motor}(\omega))$ (12) 式中: $V_{\rm s}$ 为电源内电势; $Z_{\rm s}$ 为电源内阻抗; $Z_{\rm line}$ 为电机 负荷对应线路阻抗; $Z_{\rm T}$ 为降压变压器阻抗; $Z_{\rm load}$ 为负 荷端其他等效负荷阻抗(包括其对应配电线路阻 抗); $Z_{\rm motor}(\omega)$ 为由电机转速 ω 决定的电机阻抗。

对于一个确定的等效系统,当 $Z_{motor}(\omega)$ 确定后, 稳态下的机端电压即可由系统其他参数确定。而 $Z_{motor}(\omega)$ 由电机转速 ω 确定,因此得到系统中电机的 有功功率P为附录A图A4所示的 ω -V-P空间上的1 条曲线。该曲线描述了在一个给定系统中,电机稳 态工作点随电机转速 ω 在 ω -V-P空间上的移动轨 迹。接入该系统的电机的所有稳态工作点均位于该 曲线上。

3 ω-V平面上的稳定边界

由于系统中感应电机的功率与加减速状态均可

由电机转速 ω 与机端电压V共同确定。为了更清晰地分析电机的工作状态及其与电压稳定间的关系, 建立 ω -V平面,并将电机的功率曲线、转矩差曲面投影到该平面进行分析,如图1所示。为便于展示,转矩差 ΔT 曲面以等高线形式呈现。





3.1 系统的平衡点

204

结合式(11)可知,图1中表示 ΔT =0的等高线即为电机加速、减速的分界线。为便于表述,先将此曲线定义为 ω -V平面的稳定边界,下文将详细说明该稳定边界与电压失稳间的关系。

由上文分析可知,图1中电机的ω-V曲线(曲线 1、2)表示该电机接入系统后在电路约束下所有可能 出现的稳定工作状态。因此,若电机的ω-V曲线与 该稳定边界存在交点,则表明此时的电机既满足由 电路约束的稳定工作条件,又没有进行加减速运动, 即电机处于平衡状态。该交点即为感应电机在该系 统的平衡点。

由图1可知,若电机的ω-V曲线为曲线1,则其 与稳定边界相交于点A,当电机转速低于点A的转速 时,ω-V曲线位于加速区,电机工作点将向点A移动; 而当电机转速高于点A的转速时,ω-V曲线位于减速 区,电机工作点也将向点A移动。这意味着点A为 该系统的稳定平衡点。若电机的ω-V曲线为曲线2, 则其与稳定边界交于A'、B'与C'这3点。类似上文 对点A的分析可知,点A'、C'和点A类似,也是系统的 稳定平衡点。而当系统状态位于点B'时,如果系统 受到扰动,电机的转速低于点B'的转速,电机将进入 减速区,最终沿ω-V曲线运动到达平衡点C';而如果 电机受到扰动,电机的转速高于点B'的转速,则电机 将进入加速区,电机的工作点将沿ω-V曲线移动到 平衡点A'。因此,点B'为系统的不稳定平衡点。

3.2 系统稳定边界与电压失稳的机理

利用上述ω-V平面上电机转矩差曲面和电机功 率曲线的投影及系统稳定边界可以方便地说明系统 的电压失稳机理。不同故障切除时刻对电压稳定的 影响情况如图2所示。



假设电网正常工作时,电机的ω-V曲线为图2中 的曲线2,电网短路后,电机的ω-V曲线变为曲线3。 短路瞬间,若忽略电磁暂态过程,由于电机转速不能 突变,电机工作点由曲线2上的点A变为曲线3上的 点A',由于点A'位于减速区,因此电机工作点将沿着 曲线3向左移动,直到故障切除时,电机工作点由曲 线3转移至曲线2。

若故障在点D'被清除,则电机状态跳变到点D。 由于点D位于电机的加速区,在正的转矩差下,电机 将加速,并沿曲线2向点A移动,最终到达原来的稳 定平衡点A,即此时系统不会出现电压失稳。若故 障在点E'被清除,则电机工作点转移到点E。由于 点E位于电机的减速区,因此电机工作点将沿曲线2 向点C移动,最终达到稳定平衡点C。但此时系统 到达的平衡点已经偏离原来的系统平衡点,电压维 持在点C所对应的0.5 p.u.附近,即电压跌落后不能 恢复至正常值,系统出现了电压失稳的问题。

假设短路前电机的ω-V曲线为图2中的曲线1, 由于ω-V曲线与稳定边界仅有1个稳定平衡点,即额 定工作点,则不论短路故障何时切除,电机都将回到 加速区,系统电压都将恢复到额定值,因此不会出现 电压失稳的问题。

综上,当感应电机ω-V曲线与稳定边界仅有1个 交点时,电机自身动态不会引起系统的暂态电压失 稳;当电机ω-V曲线与稳定边界有多个交点时,系统 在受到大扰动后可能会出现电压稳定问题。而电压 是否会失稳与故障切除后电机工作点与稳定边界的 位置关系有关:若故障切除后电机工作点位于稳定 边界下方的减速区域,且位于不稳定平衡点左侧,则 感应电机将减速运行,无法自行恢复到正常工作点, 系统电压也因此无法恢复至正常值,感应电机的动 态将引起系统的暂态电压失稳。

4 算例分析

4.1 暂态电压失稳的电压波形

为验证本文提出的ω-V平面中的稳定边界理论的有效性,算例1基于MATLAB/Simulink仿真平台

对附录A图A3所示的单机无穷大系统的电压稳定问题进行了分析。单机无穷大系统参数如附录A表A2所示。

系统受到的扰动为在负荷母线施加三相接地短路故障,经过故障切除时间*T*el后,短路故障切除。 为便于说明不同故障切除时间对电机动态及电压稳定性的影响,未采用实际保护设备动作时间,下文算例2类似。该系统受大扰动后的电压波形如图3 所示。



图3 系统受扰动后的电压波形

Fig.3 Voltage waveforms of system after disturbance

系统受到扰动前,负荷母线电压为0.994 p.u.。 由图3(a)可知,故障切除后,负荷母线电压在2.5 s 时恢复到正常值0.994 p.u.;由图3(b)可知,故障切 除后,负荷母线电压长期处于较低水平,无法恢复至 正常值。

4.2 暂态电压失稳的ω-V平面稳定分析

根据 ω -V曲线和 Δ T曲面的定义,可绘制该系统 在故障前以及故障时的 ω -V曲线和电机的 Δ T曲面 等高线,如图4所示。图中, Δ T=0的等高线即为稳 定边界,故障前电机的 ω -V曲线与稳定边界相交于 $A, B, C这3点,其中点A为稳态工作点。<math>\omega$ -V曲线的 BC段位于稳定边界之下,即电机的减速区。按照电压失稳的机理分析,若故障切除后,电机的工作点跳 $回到<math>\omega$ -V曲线的AB段,如图中所示的点D,则系统工 作点将向点A移动,最终稳定在原始平衡点A,系统 不会发生电压失稳;而若故障切除后,电机的工作点 跳回到 ω -V曲线的BC段,如图中所示的点E,则系统 工作点将向点C移动,最终稳定在新的平衡点C,系统将发生电压失稳。

分别将故障切除时间 $T_{el}=0.2 \text{ s} \text{ n} T_{el}=0.3 \text{ s}$ 时, 电机的实际 ω -V轨迹绘制在 ω -V平面,如图5所示。 图中,轨迹1为 $T_{el}=0.3 \text{ s}$ 时的电机 ω -V轨迹,由于故 障切除后,电机的工作点E位于稳定边界下方,即减 速区,因此电机工作点沿BC方向移动,最终稳定在 点C,电压无法恢复。而轨迹2为 $T_{el}=0.2 \text{ s}$ 时的电机 ω -V轨迹,由于故障切除后,电机的工作点D位于稳



图4 系统的ω-V曲线与稳定边界

Fig.4 ω -V curve and stability boundary of system

定边界之上,即加速区,因此电机工作点沿BA方向 移动,最终回到故障前的工作点A。由此可以看出 仿真结果与理论分析结果一致。



Fig.5 Actual ω -V trajectory of motor

4.3 ω-V曲线的误差分析

观察实际的ω-V轨迹可发现,在电压变化率较大的区域,轨迹并非完全沿着ω-V曲线移动。这是由于在绘制电机的ω-V曲线时,忽略了电机的暂态过程。若暂态过程相对于电机的惯性时间常数不够小时,在电压变化的过程中,转速的变化不能忽略, 实际的ω-V轨迹就会偏离理论分析时的ω-V曲线,这种误差在电压变化率较大的区域会更加明显。

附录A图A5为电气参数相同、转动惯量不同的 电机在暂态过程的ω-V轨迹。在故障开始阶段,小 转动惯量的电机转速下降较快,而电压受储能元件 影响缓慢下降,因此实际工作点并非跳变;大转动惯 量的电机转速下降较慢,在电机母线电压完成变化 的过程中转速几乎不变,因此该电机的实际的ω-V 轨迹更贴近理想ω-V曲线。

在进行电压稳定性判断时,由于电压是否会失 稳仅由故障切除后的电机工作点决定,因此上述暂 态过程引起的误差对稳定性的判别影响很小。

图 6 为临界状态下故障切除后的暂态ω-V轨迹, 其中图 6(a)表示系统临界不稳定,图 6(b)表示系统 临界稳定。受暂态过程影响,电机的工作点在稳定 边界附近发生了多次振荡。图 6(a)中振荡平息后的 工作点位于稳定边界下方,因此电压无法自行恢复, 系统出现电压失稳;图6(b)中振荡平息后的工作点 位于稳定边界上方,因此电压会逐渐恢复,系统不会 出现电压失稳。

206





根据两临界状态与稳定边界间的关系可知,本 文所提稳定边界可准确判断系统是否会出现电压 失稳。

4.4 两区四机系统算例

算例2考虑图7所示的两区四机系统。感应电机负荷经变压器T₆、线路L₁₃₋₁₄、变压器T₅接于母线7。相关设备参数如附录A表A3所示。系统其余参数见文献[18]。仿真仍基于MATLAB/Simulink仿真平台实现。



图 7 两区四机系统结构

Fig.7 Structure of two-area four-machine system

系统受到的扰动为1s时在母线15处施加三相 接地短路故障,经过时间 T_{el} 后,短路故障切除。此 电机在该系统中的稳定边界及不同故障切除时间下 电机的 ω -V轨迹如图8所示,对应的母线15的电压 曲线如图9所示。





fault cleaning times



图9 系统受扰动后的电压波形



图 8 中的稳定边界(Δ*T*=0 对应的等高线)与故 障前电机的ω-*V*曲线存在2个交点,分别为1个正常 工作点与1个不稳定平衡点。因此该系统存在暂态 电压失稳的可能。

对比图8中稳定边界与不同故障切除时间对应 的轨迹可知,轨迹1(*T*_{el}=0.16 s)由于故障切除后,电 机运行点位于稳定边界下方,因此故障切除后电机 继续减速,系统电压无法恢复至正常范围;而由轨迹 2(*T*_{el}=0.14 s)可知,由于故障切除后,电机运行点位 于稳定边界上方,因此故障切除后电机加速直至恢 复到正常工作状态,系统电压也随之恢复正常。

对比轨迹1、2与稳定边界间的关系可以看出, 本文所提稳定边界可有效判断系统是否会出现暂态 电压失稳。仿真结果与理论分析结果一致。

由图9所示的电压时域仿真曲线同样可看出,扰动前,母线电压为0.967 p.u.。由图9(a)可知,故障切除后,负荷母线电压在2.5 s时恢复到正常值0.967 p.u.;由图9(b)可知,故障切除后,负荷母线电压长期处于较低水平,无法恢复至正常值。

值得注意的是,本文算例分析中的电机可以是 实际接入系统的某一台具体电机,也可以是系统中 某一区域具有相似动态特性的一些电机的等效电机 负荷。当分析对象为某区域的等效电机负荷时,其 分析结果即可表征大规模系统中某区域系统的暂态 电压稳定性。

5 结论

本文提出了一种基于ω-V平面的暂态电压稳定 问题的分析方法,分析了感应电机类动态负荷引起 暂态电压失稳的机理,提出了ω-V平面的暂态电压 稳定边界。

通过分析 ω-V平面上电机 ω-V曲线与稳定边界 的交点,即系统平衡点,可以判断系统是否具有电压 失稳的可能。进一步地,通过对比实际电机运行点 与稳定边界间的关系,还可直观地判断感应电机的 加减速状态和系统是否会发生电压失稳。本文所提 的稳定边界可用于判断系统是否会出现由感应电机 引起的暂态电压失稳,这对于充分认识该类电压失 稳问题增加了一个新的视角。基于单机无穷大系统 及两区四机系统的仿真结果与理论分析验证了本文 方法的有效性。

未来笔者将进一步研究其他电力系统动态元件 接入系统后的暂态电压稳定问题。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

[1] 傅旭,王锡凡,杜正春. 电力系统电压稳定性研究现状及其展望[J]. 电力自动化设备,2005,25(2):1-9.

FU Xu, WANG Xifan, DU Zhengchun. Survey of power system voltage stability study[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(2): 1-9.

- [2] 赵卓立,杨苹,蔡泽祥,等. 含风电孤立中压微电网暂态电压稳 定协同控制策略[J]. 电力自动化设备,2015,35(10):1-9.
 ZHAO Zhuoli, YANG Ping, CAI Zexiang, et al. Cooperative control of transient voltage stability for islanded medium-voltage microgrid with wind power[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(10):1-9.
- [3] 屠竞哲,易俊,王超,等.考虑光伏动态特性的功角电压交互失 稳机理分析[J].电力系统自动化,2020,44(13):157-165.
 TU Jingzhe,YI Jun,WANG Chao, et al. Analysis on instability mechanism of power angle and voltage interaction considering dynamic characteristics of photovoltaic generator[J]. Automation of Electric Power Systems,2020,44(13):157-165.
- [4] 夏冰清,申丹枫,郑翔,等.基于准稳态模型的中长期电压稳 定轨迹多项式逼近方法[J].电力系统自动化,2020,44(8): 116-123.

XIA Bingqing, SHEN Danfeng, ZHENG Xiang, et al. Quasisteady-state model based polynomial approximation method of medium- and long-term voltage stability trajectory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(8):116-123.

- [5] KUNDUR P, PASERBA J, AJJARAPU V, et al. Definition and classification of power system stability IEEE / CIGRE joint task force on stability terms and definitions [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(3):1387-1401.
- [6]汤涌.电力系统电压稳定性分析[M].北京:科学出版社, 2011:16-23.

- [7] JEF V H, NIKOS H, THIERRY V C. Indices predicting voltage collapse including dynamic phenomena[R]. Paris, France: CIGRE, 1994.
- [8] CHOWDHURY B H, TAYLOR C W. Voltage stability analysis: V-Q power flow simulation versus dynamic simulation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(4):1354-1359.
- [9] 徐泰山,薛禹胜,韩祯祥. 暂态电压稳定的模型要求和快速判断[J]. 电力系统自动化,1995,19(12):11-15.
 XU Taishan,XUE Yusheng,HAN Zhenxiang. Modeling requirements and fast judgement of transient voltage stability[J]. Automation of Electric Power Systems,1995,19(12):11-15.
- [10] 徐泰山,薛禹胜,韩祯祥.感应电动机暂态电压失稳的定量分析[J].电力系统自动化,1996,20(6):12-15.
 XU Taishan,XUE Yusheng,HAN Zhenxiang. Quantitative analysis for transient voltage instability caused by induction motor
 [J]. Automation of Electric Power Systems,1996,20(6):12-15.
- [11] 井艳清,李兴源,郭晓鸣,等.考虑感应电动机负荷模型的暂态 电压稳定快速判据[J].电力系统自动化,2011,35(5):10-14.
 JING Yanqing,LI Xingyuan,GUO Xiaoming, et al. A quick criterion for transient voltage stability considering induction motor load models[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011,35(5):10-14.
- [12] WANG Z, WANG X, CHUNG C Y. An analytical method for calculating critical voltage sag clearance time of induction motors [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27 (4):2412-2414.
- [13] 郭国梁,马光耀,刘宝柱.电网参数对系统暂态电压稳定性影响的分析[J].陕西电力,2012,40(11):38-42.
 GUO Guoliang, MA Guangyao, LIU Baozhu. Analysis on influence of power grid parameters on transient voltage stability
 [J]. Shaanxi Electric Power,2012,40(11):38-42.
- [14] 孙华东,周孝信,李若梅. 感应电动机负荷参数对电力系统暂态电压稳定性的影响[J]. 电网技术,2005,29(23):1-6.
 SUN Huadong,ZHOU Xiaoxin,LI Ruomei. Influence of induction motor load parameters on power system transient voltage stability[J]. Power System Technology,2005,29(23):1-6.
- [15] SEKINE Y, OHTSUKI H. Cascaded voltage collapse[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1990, 5(1): 250-256.
- [16] KAWABE K, TANAKA K. Analytical method for short-term voltage stability using the stability boundary in the P-V plane [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(6): 3041-3047.
- [17] 王青子,袁小明.异步电动机幅相运动方程模型及动态过程机 理分析[J].中国电机工程学报,2021,41(1):363-373.
 WANG Qingzi,YUAN Xiaoming. Amplitude-phase motion equation model of induction motor and analysis of dynamic process mechanism[J]. Proceedings of the CSEE, 2021,41(1): 363-373.
- [18] KUNDUR P, BALU N J, LAUBY M G. Power system stability and control[M]. New York, USA: McGraw-Hill, 1994:279-311.

作者简介:



李子恒(1993—),男,工程师,硕士,主要 研究方向为电力系统稳定与运行(E-mail: 1240919439@qq.com);

王 康(1982—),男,高级工程师,博 士,主要研究方向为电力系统稳定与运行 (E-mail:wangkang163@163.com)。

李子恒

(编辑 李玮)

Transient voltage stability analysis based on speed-voltage coordinate plane

LI Ziheng¹, WANG Kang¹, LI Qi¹, LI Li¹, XIN Huanhai²

(1. State Grid Shaanxi Electric Power Co., Ltd., Xi'an 710048, China;

2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: As for the transient voltage stability problem caused by the induction motor type dynamic load, an analytical method for transient voltage stability problem based on speed-voltage coordinate plane is proposed. The stability boundary of the induction motor type dynamic load on the speed-voltage coordinate plane is described. The accelerating and decelerating state of induction motor can be directly judged according to the relationship between the operating point of motor and the stability boundary on the speed-voltage instability mechanism of the induction motor type dynamic load caused by the transient process after the disturbance can be well explained. By comparing the relationship between the operating point of the proposed stability boundary on the speed-voltage coordinate plane, whether the system voltage is stable can be judged. The simulation examples of the single-machine infinite-bus system and the two-area four-machine system verify the effectiveness of the proposed analytical method.

Key words: transient voltage stability; stability boundary; induction motor; stability analysis; speed-voltage coordinate plane

(上接第165页 continued from page 165)

Visual dual-vector modulated model predictive control method for permanent magnet synchronous motor

GUO Leilei, WANG Pengshuai, LI Yanyan, CHEN Yafei, JIN Nan

(College of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: In order to solve the problem of large current harmonics in the conventional single-vector model predictive control for permanent magnet synchronous motor, a dual-vector modulated model predictive control method for permanent magnet synchronous motor is used to reduce the current harmonics. Firstly, an objective function which is the same as that of conventional single vector model predictive control is defined. Secondly, 12 virtual voltage vectors are constructed according to the 8 basic voltage vectors of the inverter. When calculating the action times of the voltage vectors, it is assumed that the action time of each voltage vector is inversely proportional to its corresponding cost function value. Finally, in order to reduce the calculation amount, an improved voltage vector preselection method is also used. However, the dual-vector modulated model predictive control in detail, which provides a solid theoretical basis for the modulated model predictive control and its popularization and application. In addition, the proposed visual analysis method can also be extended to three-vector model predictive control. The detailed contrastive experimental results verify the effectiveness of the described control results verify the effectiveness of the proposed visual analysis.

Key words: permanent magnet synchronous motor; dual-vector; model predictive control; visualization; effectiveness verification



图 A1 感应电机等效电路 Fig.A1 Equivalent circuit of induction motor

表 A1 算例 1 采用的电机模型参数

Table A1	Parameters	of	induction	motor	for	Study	Case	1
						-		

参数	数值
电机额定功率 P_n (MW)	250
电机额定电压 V _n (kV)	20
定子电阻 R _s (p.u.)	0.0276
定子电感 L _s (p.u.)	0.0460
转子电阻 R _r (p.u.)	0.0101
转子电感 L _r (p.u.)	0.0790
励磁电感 L _m (p.u.)	1.7346
电机转动惯量 J (p.u.)	0.7
电机额定频率f(Hz)	50
电机极对数 $p_{\rm f}$	1



图 A2 电机转矩差曲面 Fig.A2 Torque difference surface of motor





Fig.A3 Structure of single-machine infinite-bus system



图 A4 接入系统的电机的有功功率曲线 Fig.A4 Power curve of system connected motor

表 A2 算例 1 系统参数设置

_

Table A2 Parameters of system for Study Case 1			
参数	数值		
系统频率 fn (Hz)	50		
系统容量基值 S _b (MV · A)	500		
高压侧电压基值 V _{bH} (kV)	345		
低压侧电压基值 V _{bL} (kV)	20		
电压源电压 V _s (kV)	345		
电源内阻 Z _s (p.u.)	0.0143 + j0.1		
变压器原边阻抗 Z _{T1} (p.u.)	0.002 + j0.08		
变压器副边阻抗 Z _{T2} (p.u.)	0.002 + j0.08		
变压器实际变比	345kV: 23.5kV		
恒阻抗负荷阻抗 Z _{const} (p.u.)	3.985 + j1.980		
短路接地阻抗 Z _{ftt} (p.u.)	0.625		
恒定转矩负载比例α(%)	10		



(a) 电压恢复过程



(b) 电压失稳过程 图 A5 不同转动惯量的电机的转速-电压轨迹

Fig.A5 Speed-voltage trajectory of motors of different inertia constants

表 A3 算例 2 系统参数设置

Table A3 Parameters of s	ystem for Study Case 2
--------------------------	------------------------

		·····	
参数	数值	参数	数值
系统频率(Hz)	60	系统容量基准值 (MV · A)	100
变压器 T5 容量 (MV ・ A)	150	变压器 T6 容量 (MV · A)	30
变压器 T5 变比	230/110	变压器 T6 变比	110/20
T5 原边阻抗(p.u.)	0.002 + j0.08	T6 原边阻抗(p.u.)	0.002 + 0.08i
T5 副边阻抗(p.u.)	0.002 + j0.07	T6 副边阻抗(p.u.)	0.002 + 0.07i
线路电阻 (Ω)	14.4125	线路电感 (H)	0.1312
电机额定功率 (MW)	2.5	电机额定电压 (kV)	20
定子电阻(p.u.)	0.0276	转子电阻 (p.u.)	0.0101
定子电感(p.u.)	0.0460	转子电感 (p.u.)	0.0790
励磁电感(p.u.)	1.7346	电机极对数	1
恒定转矩负载(p.u.)	0.9	变转矩系数 K	0.1
电机转动惯量(p.u.)	0.25	短路接地阻抗(Ω)	0.01