

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2021.05.019

海洋采油平台直流配电网瞬时负载的适应性评估

李昌明¹, 闫红华²

(1. 电网智能化调度与控制教育部重点实验室(山东大学), 山东 济南 250061;
2. 山东国瑞电力科技有限公司, 山东 济南 250003)

摘要: 在海洋石油工程中, 电动机是主要的电气负载, 其起动过程可能会产生瞬时冲击, 影响直流配电网的系统性能。文中基于降阶解析的思想, 对此特殊场景下瞬时负载的影响开展研究。首先在一定条件下简化系统动态微分代数方程, 推导直流母线电压的近似解析表达式; 然后研究瞬时有功负载对海洋采油平台直流母线电压的影响; 最后在 PSCAD/EMTDC 中搭建四端柔性直流配电网模型并设置不同的瞬时负载进行仿真, 分析不同瞬时负载情况下的直流母线电压, 验证文中所提解析表达式的正确性。结果证明, 文中的解析表达式可以有效反映海洋采油平台直流配电网对瞬时负载的适应性。

关键词: 直流配电网; 适应性评估; 瞬时负载; 直流母线电压; 解析表达式; 海洋采油平台

中图分类号: TM74

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2021)05-0136-08

0 引言

直流配电技术可摒弃交流海缆无功充电功率较大的弊端^[1], 利于分布式清洁能源的接入, 在技术和经济方面更有优势^[2-5], 因而直流配电网在海洋采油平台展现出较为良好的应用前景。但海洋采油工程电机类负载直接起动时会导致瞬时的负荷冲击^[6-7], 可能影响直流配电网运行。

直流配电网对瞬时负载的适应能力, 一定程度上可以通过扰动后直流电压的跌落程度来衡量^[8]。此电压动态过程可依靠时域仿真获取, 但是计算量普遍较大, 而且不利于揭示机理规律。另一方面, 精确的解析分析将面对非线性高阶微分方程的求解问题, 存在一定的困难。

过去几十年, 已有学者在瞬时负载的影响方面开展了相关研究, 但是大多数仅针对交流电网。文献[9]提出了基于均方根电压水平的电能质量指数, 并用于电机起动引起的电压变化评估; 文献[10]给出了3个与电机起动相关的图表, 以揭示相关电能质量问题的关键因素; 文献[11]提出了一种基于黎曼求和原理评估电压下降程度和发电机电流暂态冲击的方法; 文献[12]则通过仿真分析了微电网中电机起动电流与电压降之间的关系。

而在直流配电网的受扰后动态分析方面, 已有研究构造不同形式的稳定判据以评估动态过程的稳定性。文献[13]总结了柔性直流配电系统稳定性分析及控制面临的挑战; 文献[14]基于潮流可行解

提出电压稳定分析方法; 文献[15-16]利用小信号阻抗分析法, 借助伯德图和奈奎斯特法评估系统稳定性; 文献[17]提出适用于交直流混联配电系统的阻抗匹配稳定性分析方法, 确定了阻抗稳定边界; 文献[18]则依靠小信号模型的零极点分布评估稳定性。针对大扰动稳定分析, 文献[19-20]建立了系统的混合势函数模型, 文献[21]则利用李雅普诺夫直接法分析了直流微电网的大扰动稳定性, 虽然涉及大扰动稳定性, 但其结果通常偏保守, 无法准确给出稳定域。

综上所述, 目前有关瞬时冲击负载的影响研究主要集中于交流电网, 专门针对直流电网的研究较为少见。在动态性能的评估中^[22], 多是间接构造稳定判据^[23]或进行时域仿真, 两者均存在一定的困难, 如稳定判据较为复杂, 时域仿真难于解析。

文中采用简化降阶的思路对系统微分代数方程做一定的合理近似, 在不显著影响精度的情况下给出了直流电压动态的解析表达式, 直观评估不同瞬时负载情况下直流母线电压的跌落程度, 研究了海洋采油平台直流配电网对瞬时负载的适应性。模型仿真验证了解析表达式的正确性。

1 海洋采油平台电机起动特性

在海洋油气开采中, 其核心部件为电潜泵、压缩机、注水泵、增压泵等采油设备, 多采用大容量异步电动机驱动, 负载容量较大, 某些负载单机容量甚至可超过1 MW, 几种典型的海洋采油平台电机参数如表1所示。

上述电机起动时, 起动电流远大于额定电流,

收稿日期: 2021-03-25; 修回日期: 2021-06-09

基金项目: 山东省自然科学基金资助项目(ZR2019MEE078)

表 1 典型电机参数
Table 1 Typical motor parameters

电机	额定电压/kV	额定功率/kW	额定电流/A
1	2.60	312	98.0
2	2.80	376	108.0
3	4.40	439	81.0
4	3.93	746	153.0
5	6.30	1 250	139.2

并吸收大量功率,对系统产生严重的冲击。不同的电机起动方式其冲击情况不同,当采用降压起动、变频起动等软起动方式时,其吸收功率约为额定功率的 1~3 倍,而当电机采用直接起动时,冲击情况更严重,此时吸收功率可达额定功率的 3~7 倍。

直流配电网不存在功角稳定性、频率稳定性的问题,影响其性能的主要因素为直流电压稳定性。而直流母线电压受有功功率供需关系影响,电机起动时吸收的无功功率不会直接影响系统的直流电压稳定性,因此文中将以图 1 所示瞬时负载情况为例分析海洋采油平台直流配电网对瞬时负载的适应性。

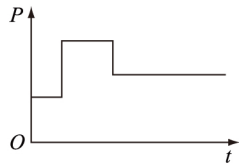


图 1 瞬时负载的功率波形

Fig.1 The power waveform of instantaneous load

2 瞬时冲击下直流配电网电压解析

2.1 直流母线电压解析表达式

海洋采油平台的直流配电网结构通常如图 2 所示,其通过 AC/DC 换流器从交流侧获取电力,分别通过 DC/AC 和 DC/DC 换流器为交流负载、直流负载供电,并通过换流器接入风电、光伏等新能源发电形式^[24]。

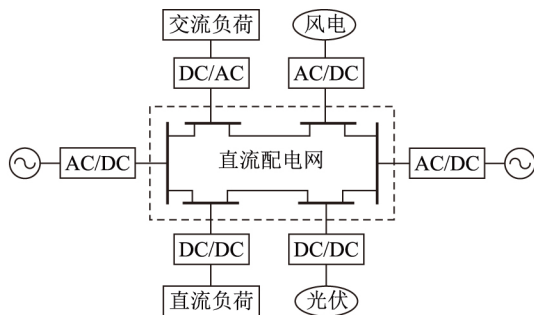


图 2 直流配电网结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of DC distribution network

直流配电网存在一个采用定电压控制的换流主站,决定直流侧电压水平。其典型控制分为内外双环,如图 3 所示。其中 U_{dc}^* 为直流侧电压设定值; U_{dc} 为直流母线实际电压; $K_{p1}, K_{i1}, K_{p2}, K_{i2}$ 为 PI 控制系统参数; i_d^* 为交流侧 d 轴电流分量的参考值; i_d, i_q 分别为交流侧 d 轴、 q 轴电流分量的实际值; e_d 为交流侧电源电压 d 轴分量的实际值; U_d^* 为通过控制获得的调制电压 d 轴分量的参考值; R, L 分别为交流侧等效电阻和电感; ω 为交流角速度。

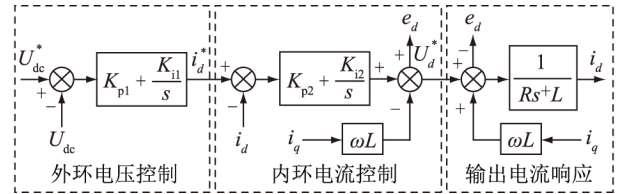


图 3 主站直流电压控制框图

Fig.3 Control block diagram of master station DC bus voltage

由于电流内环控制的时间常数和测量延时通常远小于系统动态过程和电压外环控制的时间常数,因此文中忽略电流内环的动态过程,认为其瞬时达到控制目标。由图 3 计算可得:

$$i_d \approx i_d^* = \left[K_{p1} (U_{dc}^* - U_{dc}) + K_{i1} \int (U_{dc}^* - U_{dc}) dt \right] \quad (1)$$

因此,交流侧输入的功率为:

$$P = \frac{3}{2} e_d i_d \approx \frac{3}{2} e_d i_d^* = \frac{3}{2} e_d \left[K_{p1} (U_{dc}^* - U_{dc}) + K_{i1} \int (U_{dc}^* - U_{dc}) dt \right] \quad (2)$$

换流站的直流侧等效电路见图 4,其中 C_{eq} 为换流站等效电容; R_{ij}, L_{ij}, C_{ij} 为线路参数; P_{dc} 为换流站向直流侧输出的功率; P_{ac} 为交流侧输入功率;电流源 i_c 为交流侧等效电源; i_{loss} 为换流站损耗。

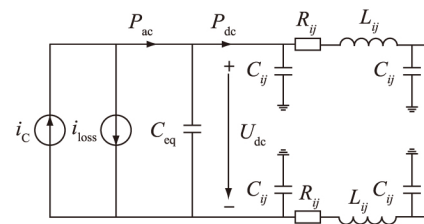


图 4 换流站等效电路

Fig.4 Equivalent circuit diagram of converter station

通常换流站损耗可忽略。由图 4 可得,瞬时冲击负载时直流母线电压表达式为:

$$C_{eq} U_{dc} \frac{dU_{dc}}{dt} = P_{ac} - P_{dc} \approx \frac{3}{2} e_d \left[K_{p1} (U_{dc}^* - U_{dc}) + K_{i1} \int (U_{dc}^* - U_{dc}) dt \right] - P_{dc} \quad (3)$$

初始时刻 直流电压记为 U_{dc0} ,在较短时间 Δt 内 ,认为 $dU_{dc} \ll U_{dc0}$,可得:

$$\frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{\frac{3}{2}e_d \left[K_{p1}(U_{dc}^* - U_{dc}) + K_{i1} \int (U_{dc}^* - U_{dc}) dt \right] - P_{dc}}{C_{eq} U_{dc}} \approx \frac{\frac{3}{2}e_d \left[K_{p1}(U_{dc}^* - U_{dc}) + K_{i1} \int (U_{dc}^* - U_{dc}) dt \right] - P_{dc}}{C_{eq} U_{dc0}} \quad (4)$$

假设初始时刻电压为 U_{dc}^* ,电流为 i_{d0} ,瞬时负载为 P_{dc0} ,以此对式(4) 求解可得:

$$U_{dc} = \begin{cases} \frac{1.5e_d i_{d0} - P_{dc0}}{C_{eq} U_{dc}^* \sqrt{a^2 K_{p1}^2 - 4aK_{i1}}} (e^{\gamma_1 t} - e^{\gamma_2 t}) + U_{dc}^* & aK_{p1}^2 > 4K_{i1} \\ e^{-aK_{p1}t/2} \frac{1.5e_d i_{d0} - P_{dc0}}{C_{eq} U_{dc}^*} t + U_{dc}^* & aK_{p1}^2 = 4K_{i1} \\ e^{-aK_{p1}t/2} \frac{1.5e_d i_{d0} - P_{dc0}}{C_{eq} U_{dc}^* b} \sin(bt) + U_{dc}^* & aK_{p1}^2 < 4K_{i1} \end{cases} \quad (5)$$

其中:

$$\begin{cases} a = 3e_d / (2C_{eq} U_{dc}^*) \\ b = \sqrt{4aK_{i1} - a^2 K_{p1}^2} / 2 \\ \gamma_1 = (-aK_{p1} + \sqrt{a^2 K_{p1}^2 - 4aK_{i1}}) / 2 \\ \gamma_2 = (-aK_{p1} - \sqrt{a^2 K_{p1}^2 - 4aK_{i1}}) / 2 \end{cases} \quad (6)$$

对式(5) 进行分析与计算 ,可得瞬时负载时电压跌落的极限值为:

$$U_{demin} = \begin{cases} \frac{1.5e_d i_{d0} - P_{dc0}}{C_{eq} U_{dc}^* \sqrt{a^2 K_{p1}^2 - 4aK_{i1}}} \times (e^{\gamma_1(\ln \gamma_2 - \ln \gamma_1)} / (\gamma_1 - \gamma_2) - e^{\gamma_2(\ln \gamma_2 - \ln \gamma_1)} / (\gamma_1 - \gamma_2)) + U_{dc}^* & aK_{p1}^2 > 4K_{i1} \\ e^{-1} \frac{3e_d i_{d0} - 2P_{dc0}}{C_{eq} U_{dc}^* aK_{p1}} + U_{dc}^* & aK_{p1}^2 = 4K_{i1} \\ e^{-\frac{aK_{p1} \arctan[2b/(aK_{p1})]}{2b}} \frac{1.5e_d i_{d0} - P_{dc0}}{C_{eq} U_{dc}^* b} \times \sin \arctan[2b/(aK_{p1})] + U_{dc}^* & aK_{p1}^2 < 4K_{i1} \end{cases} \quad (7)$$

同上分析 ,可根据表达式求出瞬时负载结束时的电压及电流 ,进而求得瞬时负载结束后的直流母线电压表达式 ,其表达形式与上述表达式类似 ,不再赘述。

2.2 系统调制分析

当直流母线电压跌落时 ,会使调制比增大 ,可能导致调制波处于过调制区 ,影响系统的调制。模块化多电平换流器(modular multilevel converter , MMC) 型柔性直流与传统直流相比具有不存在换相失败等优点 ,适合构成多端直流系统^[25] ,具有光明的应用前景 ,因此文中以此为例分析直流电压跌落对调制的影响。

柔性直流换流器通常采用最近电平逼近调制 ,其正常工作的调制范围为 $U_{dc}/2$ 。考虑交流侧接地 ,换流站的结构如图5 所示。

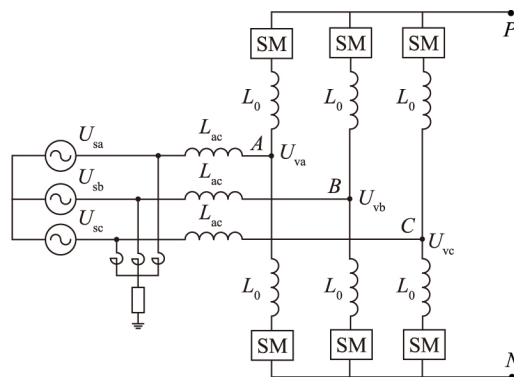


图5 换流站结构

Fig.5 Structure of the converter station

其中 SM 为桥臂模块; L_{ac} , L_0 分别为交流侧等效电感及桥臂电感; U_{sa} , U_{sb} , U_{sc} 为交流侧电源相电压; U_{va} , U_{vb} , U_{vc} 为调制得到的交流侧电压。

在最近电平逼近调制中 ,三相的上、下桥臂导通的子模块数 N_{pj} , N_{nj} (j 为 a、b、c 三相) 为:

$$\begin{cases} N_{pj}(t) = N/2 - \text{round}(U_{vj}^*(t)/U_c) \\ N_{nj}(t) = N/2 + \text{round}(U_{vj}^*(t)/U_c) \end{cases} \quad (8)$$

式中: N 为桥臂子模块数; $U_{vj}^*(t)$ 为调制电压参考值; U_c 为桥臂电容电压值; $\text{round}(U_{vj}^*(t)/U_c)$ 为距离 $U_{vj}^*(t)/U_c$ 最近的整数 ,且在实际控制中其存在 $\pm N/2$ 的限值。

为分析最近电平逼近调制工作在过调制区的调制情况 ,可暂时不考虑桥臂电感的作用^[25]。

故正极点 P 与连接点 J (J 代表 A、B、C 三点) 的电压 U_{PJ} ,即上桥臂电压值为:

$$U_{PJ} = [N/2 - \text{round}(U_{vj}^*(t)/U_c)] U_c \quad (9)$$

直流侧正对地电压可以表示为:

$$U_{PG} = (U_{PA} - U_{AG} + U_{PB} - U_{BG} + U_{PC} - U_{CG}) / 3 = NU_c / 2 - [\text{round}(U_{va}^*(t)/U_c) + \text{round}(U_{vb}^*(t)/U_c) + \text{round}(U_{vc}^*(t)/U_c)] U_c / 3 \quad (10)$$

式中: U_{PA} , U_{PB} , U_{PC} 分别为 a、b、c 三相的上桥臂

电压; U_{AG}, U_{BG}, U_{CC} 分别为 a、b、c 三相连接点 J 对地电压。

当待调制电压未超出正常工作的调制范围时, $\text{round}(U_{vj}^*(t)/U_C)$ 未达到限值, 故:

$$\begin{aligned} \text{round}\left(\frac{U_{va}^*(t)}{U_C}\right) + \text{round}\left(\frac{U_{vb}^*(t)}{U_C}\right) + \text{round}\left(\frac{U_{vc}^*(t)}{U_C}\right) = \\ \text{round}\left(\frac{U_{va}^*(t)}{U_C} + \frac{U_{vb}^*(t)}{U_C} + \frac{U_{vc}^*(t)}{U_C}\right) = 0 \quad (11) \end{aligned}$$

所以 $U_{PG} = NU_C/2 = U_{dc}/2$, 可实现良好调制。

当调制电压超出正常工作的调制范围时, $\text{round}(U_{vj}^*(t)/U_C)$ 可达到限值, 故式(11)不再恒等于 0, 所以直流侧正极电压不再等于 $U_{dc}/2$, 调制得到的交流电压 $U_{vj} = U_{PG} - U_{PJ}$ 也不再是良好的正弦波, 而是如图 6 所示的波形。

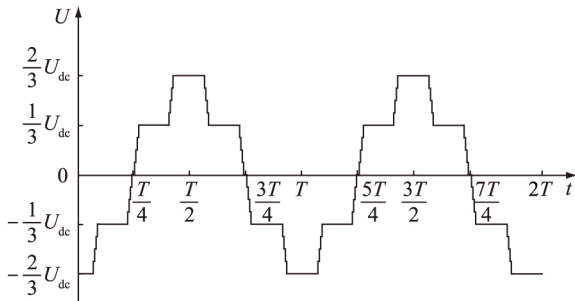


图 6 调制得到的交流电压波形

Fig.6 The approximate modulation waveform of equivalent AC-side voltage

在此情况下, 调制出的交流电压包含 $6k - 1$ 次负序谐波分量, $6k + 1$ 次正序谐波分量, 因此会产生 $6k - 1$ 次电流负序谐波分量, $6k + 1$ 次电流正序谐波分量, 进而产生 $6k$ 次谐波功率波动, 造成直流母线电压产生 $6k$ 次谐波, 而在交流侧又调制出 $6k - 1$ 次负序谐波分量, $6k + 1$ 次正序谐波分量。

2.3 瞬时负载对直流配电网的影响

当直流侧负载突增时, 直流侧吸收功率快速增加, $P_{dc} > P_{ac}$, 导致直流母线电压下降。

根据式(7)可得, 瞬时负载时直流母线电压极限值 U_{demin} 与主站 PI 控制参数及瞬时负载的定性关系如图 7 所示。

由图 7(a)、图 7(b) 可以看出随着 K_{pl}, K_{il} 的减小, 直流电压极限值 U_{demin} 减小, 电压跌落程度增大, 海洋石油直流配电网对瞬时负载的适应性变差, 直流系统的控制会影响海洋石油直流配电网对瞬时负载的承受能力。

而不同电机参数及不同的电机起动方式会影响到瞬时负载的大小, 由图 7(c) 可以看出, 当瞬时负载增大时, 直流母线电压跌落加深, 海洋采油平

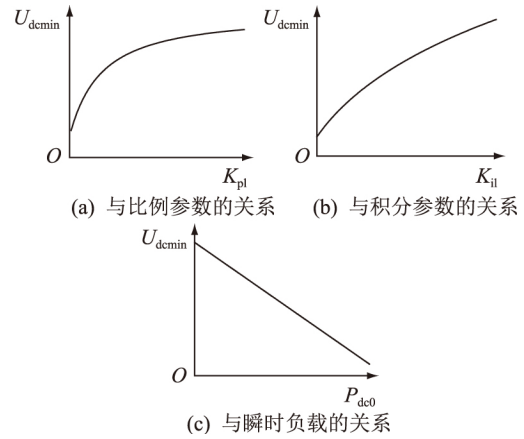


图 7 直流电压极限值 U_{demin} 与不同参数的关系

Fig.7 The relationship between U_{demin} and different parameters

台的适应性变差。同时, 随着直流电压的降低, 调制出的交流电压不再是良好的正弦波, 而将包含大量的 $6k - 1$ 次负序谐波分量和 $6k + 1$ 次正序谐波分量。

3 案例仿真

建立如图 8 所示的四端柔性直流配电网仿真模型。交流侧额定电压为 10 kV, 两侧交流系统通过基于钳位双子模块的 MMC 与直流线路相连, 换流器电平数为 11。MMC1 模拟直流配电网的主站, 采用定直流电压及无功功率的控制方式, 直流电压为 20 kV, 交流侧吸收的无功功率为 0 Mvar。MMC2 采用定有功功率及无功功率的控制方式, 交流侧吸收有功功率为 5 MW, 无功功率为 0 Mvar。光伏利用最大功率点跟踪控制输出 5 MW 的功率。直流负载处采用定负载直流电压控制方法, 保持负载处电压为 0.75 kV。

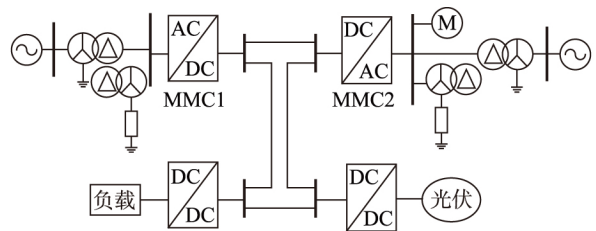


图 8 四端柔直配电网系统结构

Fig.8 The system structure of a four terminal DC distribution network

文中通过改变电阻来模拟电机起动时产生的瞬时有功冲击负荷现象, 1 s 时在负载侧并联电阻 R_0 , 持续时间为 1 s, 此后电阻变为 R_1 。通过比较仿真与解析式计算得到直流母线电压波形, 验证了解析式的正确性。比较不同仿真情况下的电压跌落程度, 验证了 2.3 节利用解析式得到的直流母线电

压跌落与控制参数及瞬时负载值之间的关系,进一步验证了文中所提解析表达式可以反映直流配电网对瞬时负载的适应性这一观点。

3.1 解析表达式验证

设置不同的控制参数及不同的瞬时负载进行仿真,并利用求得的解析表达式进行计算,得到不同情况下 U_{dc} 的波形,如图 9 所示。

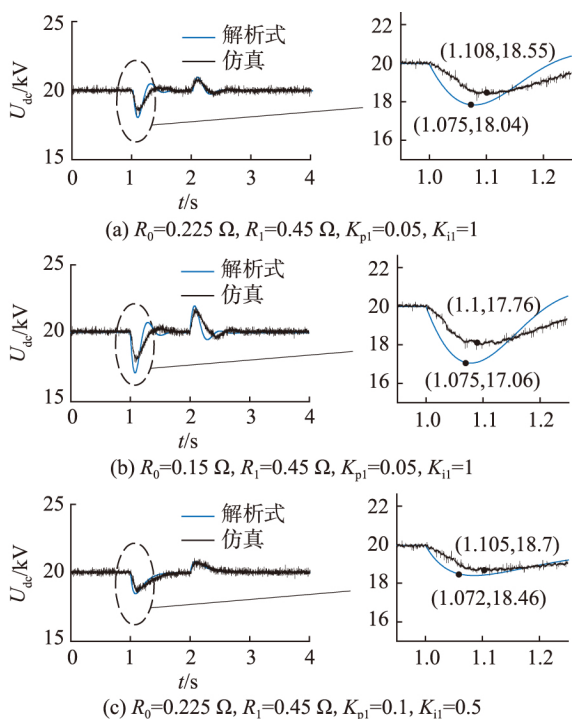


图 9 直流母线电压波形对比验证
Fig.9 The comparison validation of DC bus voltage waveforms

由图 9 可知,通过解析式得到的波形与仿真得到的波形近似一致,经计算三者最大误差分别为 2.75%、3.94%、1.28%,误差在可接受范围内,可以得出文中推导的解析表达式是正确的。

3.2 不同主站 PI 控制参数下瞬时负载仿真分析

使瞬时负载保持在 $R_0 = 0.125 \Omega$, $R_1 = 0.25 \Omega$, 对主站 PI 控制环节设置不同的控制参数进行仿真,记录其 U_{dc} 的仿真波形见图 10。由图 10 可知,1 s 时 U_{dc} 先降低,而后逐渐上升,存在一个最小值。通过图 10 (a)、(b) 和 (c) 的对比分析,可以看出当瞬时负载情况确定时,随着控制参数 K_{pi} , K_{ii} 的减小,电压最小值减小,直流母线电压跌落增大,海洋采油平台对瞬时负载的适应性变差。

3.3 不同瞬时负载下仿真分析

控制参数不变,通过保持并联电阻倍数相同而瞬时负载结束后电阻值不同,近似模拟不同电机参数、相同起动方式下的电机起动瞬时有功负荷,得到不同瞬时负载时的直流母线电压波形,见图 11。

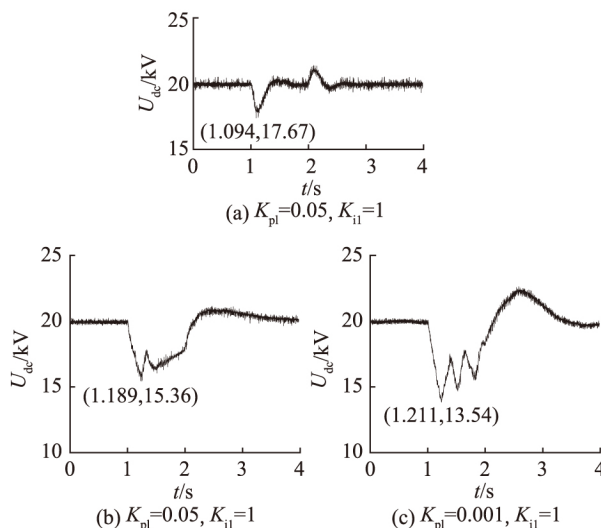


图 10 不同 PI 控制参数模拟下直流母线电压波形
Fig.10 The DC bus voltage waveforms under different PI control parameters simulation

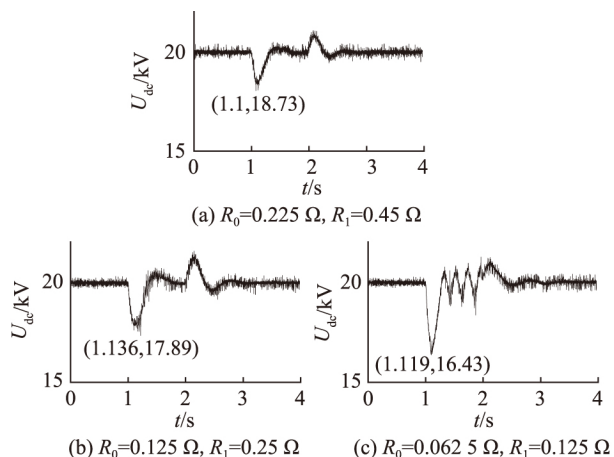


图 11 不同电机参数模拟下直流母线电压波形
Fig.11 The DC bus voltage waveforms under different motor parameters simulation

由图 11 可知,瞬时负载导致 U_{dc} 跌落,而且当主站 PI 控制参数确定时,随着并联电阻的减小,直流母线电压跌落增大,即电机容量越大,电机起动时吸收功率越多,海洋采油平台直流配电网的适应性越差。

保持控制参数不变,通过使瞬时负载结束后的并联电阻值相同,瞬时负载时的并联电阻值不同来近似模拟相同电机参数、不同起动方式下的电机起动瞬时有功负荷,可得到瞬时负载结束后负载相同而瞬时负载值不同时的直流母线电压波形,如图 12 所示,可以近似反映不同电机起动方式时的系统运行情况。

由图 12 可知,随着瞬时电阻 R_0 的减小,直流母线电压跌落增大,即电机起动时吸收功率越大,电压跌落越大,此起动方式下直流配电网对电机负载

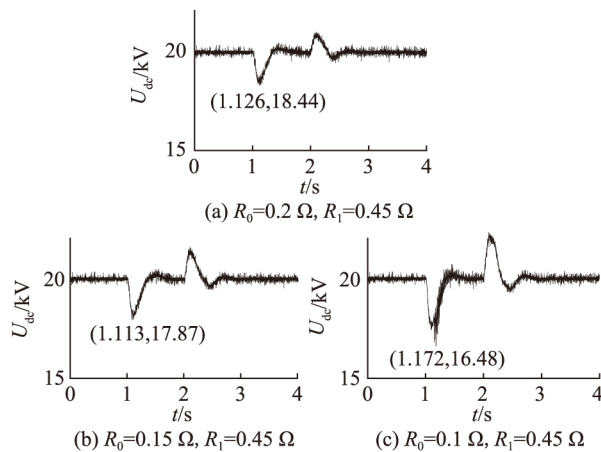


图 12 不同电机起动方式模拟下直流母线电压波形

Fig.12 The DC bus voltage waveforms under different motor starting modes simulation

起动的适应性越差。

为验证直流电压跌落时的调制情况,对图 11 (b) 所对应的模型进行仿真,得到交流侧电压仿真波形如图 13 所示。

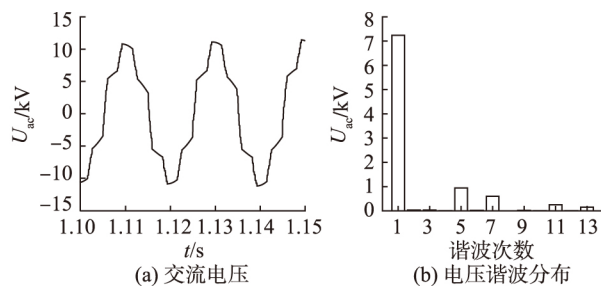


图 13 系统仿真波形

Fig.13 The waveforms of simulation

由图 13 可知,当直流电压跌落使调制波超出调制范围时,交流侧电压不再为正弦波,此时交流电压的 $6k-1$ 和 $6k+1$ 次谐波分量显著增加。由此可以看出,瞬时有功负载会影响海洋采油平台直流配电网的电能质量,导致系统交流侧产生大量谐波。

4 结论

文中针对海洋石油工程电机起动时的瞬时冲击负载,通过简化降阶推导瞬时负载时直流母线电压的解析表达式,得出以下结论:

(1) 通过仿真验证可得通过文中推导的解析表达式与仿真得到的波形差异在误差可接受范围内,文中的解析表达式可以有效反映瞬时负载时电压跌落情况。

(2) 通过解析式可得,海洋采油平台直流配电网网站的控制参数会影响其对瞬时负载的适应性,随着 PI 控制参数的减小,其对瞬时负载的适应性变差。此外,不同电机参数及不同电机起动方式也会

影响其适应性,电机起动时瞬时负载越大,海洋采油平台的直流母线电压跌落越大,适应性越差。

(3) 海洋采油平台直流配电网直流电压的跌落易导致调制波超出调制范围,影响调制波的调制,使系统电能质量变差。

文中仅分析了电机起动时产生的瞬时有功负荷,未来可进一步研究瞬时无功负荷对海洋石油直流配电网的冲击及对自身起动情况的影响。

本文得到中海石油(中国)有限公司北京研究中心科技项目(CCL2019RCPS0268RSN)资助,谨此致谢!

参考文献:

- [1] LI Y, HE L, LIU F, et al. Flexible voltage control strategy considering distributed energy storages for DC distribution network [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1): 163-172.
- [2] 吴建章,沙浩源,张宸宇,等.基于 PSO-SVM 的直流配电网电能质量扰动辨识[J]. 电力工程技术, 2019, 38(4): 18-25. WU Jianzhang, SHA Haoyuan, ZHANG Chenyu, et al. Identification of power quality disturbance in DC distribution network based on PSO-SVM [J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(4): 18-25.
- [3] 梁伟豪,周潮,涂智豪,等.分布式光伏接入对配电网可靠性影响的快速评估方法[J]. 供用电, 2020, 37(2): 60-66. LIANG Weihao, ZHOU Chao, TU Zhihao, et al. Fast evaluation method of the impact of distributed photovoltaic access on the reliability of distribution network [J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(2): 60-66.
- [4] 曾鸣,彭丽霖,王丽华,等.主动配电网下分布式能源系统双层双阶段调度优化模型[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6): 108-115. ZENG Ming, PENG Lilin, WANG Lihua, et al. Two-stage dual-level dispatch optimization model of distributed energy system in active distribution network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 108-115.
- [5] 赵政嘉,李海波,赵宇明,等.多类型分布式电源接入下的低压交流与直流配电网运行经济性对比[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(12): 50-61. ZHAO Zhengjia, LI Haibo, ZHAO Yuming, et al. Operational economic comparison of low voltage AC and DC distribution networks with multi-type distributed generation integration [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(12): 50-61.
- [6] LENG S Y, UL HAQUE A R N M R, PERERA N, et al. Soft start and voltage control of induction motors using floating capacitor h-bridge converters [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(4): 3115-3123.
- [7] VANDERMEULEN A, NATALI T, DIONISE T, et al. Exploring new and conventional starting methods of large medium voltage induction motors on limited kV·A sources [J]. 2018 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS), 2018: 1-10.
- [8] 黄华颖,叶锦坤,饶苏敏,等.配电网对称跌落下光伏系统不

- 稳定机理及对策研究[J]. 供用电, 2020, 37(11): 64-69.
- HUANG Huaying, YE Jinkun, RAO Sumin, et al. Research on instability mechanism and countermeasures of photovoltaic system under symmetrical sag of distribution network [J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(11): 64-69.
- [9] HSU C T, CHUANG H J, CHEN C S. Power quality assessment of large motor starting and loading for the integrated steel-making cogeneration facility [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2007, 43(2): 395-402.
- [10] WANG X Y, YONG J, XU W, et al. Practical power quality charts for motor starting assessment [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(2): 799-808.
- [11] LIU W Z, TARASIUK T, SU C L, et al. An evaluation method for voltage dips in a shipboard microgrid under quasi-balanced and unbalanced voltage conditions [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(10): 7683-7693.
- [12] SAIPRASAD S, SONI N, DOOLLA S. Analysis of motor starting in a weak microgrid [C]//2014 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES). Mumbai, India. IEEE, 2014: 1-5.
- [13] 彭克, 陈佳佳, 徐丙垠, 等. 柔性直流配电系统稳定性及其控制关键问题[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(23): 90-98, 115.
- PENG Ke, CHEN Jiajia, XU Bingyin, et al. Key issues of stability and control in flexible DC distribution system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(23): 90-98, 115.
- [14] 张聪, 彭克, 徐丙垠, 等. 直流配电系统潮流可行解与电压稳定性分析方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(14): 48-53.
- ZHANG Cong, PENG Ke, XU Bingyin, et al. Feasible power flow solution and voltage stability analysis method for DC distribution system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(14): 48-53.
- [15] MOHAMAD A M I, MOHAMED Y A R I. Impedance-based analysis and stabilization of active DC distribution systems with positive feedback islanding detection schemes [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(11): 9902-9922.
- [16] MOHAMAD A M I, MOHAMED Y A R I. Investigation and enhancement of stability in grid-connected active DC distribution systems with high penetration level of dynamic loads [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(9): 9170-9190.
- [17] 张学, 裴玮, 邓卫, 等. 含恒功率负载的交直流混联配电系统稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(19): 5572-5582, 5834.
- ZHANG Xue, PEI Wei, DENG Wei, et al. Stability analysis of AC/DC hybrid distribution system with constant power loads [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(19): 5572-5582, 5834.
- [18] SHAMSI P, FAHIMI B. Stability assessment of a DC distribution network in a hybrid microgrid application [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(5): 2527-2534.
- [19] 厉泽坤, 孔力, 裴玮, 等. 基于混合势函数的下垂控制直流微电网大扰动稳定性分析[J]. 电网技术, 2018, 42(11): 3725-3734.
- LI Zekun, KONG Li, PEI Wei, et al. Large-disturbance stability analysis of droop-controlled DC microgrid based on mixed potential function [J]. Power System Technology, 2018, 42(11): 3725-3734.
- [20] 厉泽坤, 孔力, 裴玮. 直流微电网大扰动稳定判据及关键因素分析[J]. 高电压技术, 2019, 45(12): 3993-4002.
- LI Zekun, KONG Li, PEI Wei. Analyses of stability criterion and key factors of DC microgrid under large disturbance [J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(12): 3993-4002.
- [21] 支娜, 张辉, 肖曦, 等. 分布式控制的直流微电网系统级稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(2): 368-378.
- ZHI Na, ZHANG Hui, XIAO Xi, et al. System-level stability analysis of DC microgrid with distributed control strategy [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(2): 368-378.
- [22] 杨海柱, 岳刚伟, 范书豪. 直流微网自适应动态下垂控制策略研究[J]. 电源学报, 2019, 17(2): 101-108.
- YANG Haizhu, YUE Gangwei, FAN Shuhao. Research on adaptive dynamic droop control strategy for DC microgrid [J]. Journal of power supply, 2019, 17(2): 101-108.
- [23] 王久和, 王勉, 吴学智, 等. 直流分布式电源系统稳定性判据研究综述[J]. 发电技术, 2020, 41(2): 175-185.
- WANG Jiuhe, WANG Mian, WU Xuezhi, et al. Review of stability criteria study for direct current distributed power system [J]. Power Generation Technology, 2020, 41(2): 175-185.
- [24] 李猛, 王利利, 陈鹏浩, 等. 一种直流配电网中换流站的选址定容方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(21): 109-116.
- LI Meng, WANG Lili, CHEN Penghao, et al. Method for selecting and setting the capacity of a converter station in a DC distribution network [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(21): 109-116.
- [25] 徐政, 肖晃庆, 张哲任, 等. 柔性直流输电系统[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- XU Zheng, XIAO Huangqing, ZHANG Zheren, et al. Voltage source converter based HVDC power transmission systems [M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2016.

作者简介:



李昌明

李昌明(1996)男, 硕士在读, 研究方向为直流配电网(E-mail: lcml@mail.sdu.edu.cn); 闫红华(1979)男, 硕士, 高级工程师, 从事电力系统及其自动化相关工作。

Adaptability evaluation of instantaneous load on DC distribution network in offshore oil platform

LI Changming¹, YAN Honghua²

(1. Key Laboratory of Power System Intelligent Dispatch and Control of Ministry of Education Shandong University, Jinan 250061, China; 2. Shandong Green Power Technology Co., Ltd., Jinan 250003, China)

Abstract: Motors comprise the major electricity loads in offshore oil projects and motor starting may lead to instantaneous impacts. The impacts probably deteriorates system performance if DC distribution networks are employed. Based on the idea of analytical expression the impacts of such loads are analyzed. Firstly, by simplifying the differential algebraic equations of the system, the analytical expression of DC bus voltage is derived. Then the impacts of instantaneous active load on DC distribution network in offshore oil platform are researched. Finally, a four terminal DC distribution network model based on the PSCAD/EMTDC platform is built and different instantaneous loads are set for simulation. The DC bus voltage under different instantaneous loads is analyzed. The correctness of the analytical expression is verified. The results show that the analytical expression effectively reflects the adaptability of instantaneous load on DC distribution network in offshore oil platform.

Keywords: DC distribution network; adaptability evaluation; instantaneous load; DC bus voltage; analytical expression; offshore oil platform

(编辑 陆海霞)

(上接第 70 页)

Comprehensive evaluation of node voltage sag based on power system and equipment sensitivity analysis

ZOU Zeyu, LIU Wenze

(School of Electric Power South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: Aiming at the demand of evaluating voltage sag severity considering both electric utilities and users, an evaluation method based on power system and equipment sensitivity analysis is proposed. Initially, based on the focus of voltage sag assessment on system and user-side, the comprehensive attribute set is formed. The system-side index set is constructed with the average influence degree index as well as the voltage sag frequency index, further forms a comprehensive evaluation index set with the failure rate index. The average influence degree index is formed based on cumulative distribution density functions, statistical table and severity indices. The failure rate index is formed based on the comprehensive voltage tolerance curve and energy loss calculation. Then, the indices are weighted and Mahalanobis distance-based technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS) is used to reflect the voltage sag severity levels. The simulation model of the IEEE 30-bus system is built so that the proposed method could be used to evaluate the voltage sag severity. The result could help find out the nodes which suffer from greater impacts of voltage sag events. Finally, the fuzzy C-clustering method is used to analyze the evaluation results. It is verified that the proposed evaluation method is helpful to overcome the one-sided problem of single index evaluation.

Keywords: voltage sag; severity assessment; Monte Carlo simulation; Mahalanobis distance-based technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS); combination weights; fuzzy C-clustering method

(编辑 钱悦)