

基于MMC的柔性直流配电系统低频振荡机理分析

张浩, 彭克, 刘盈杞, 姜淞瀚

(山东理工大学 电气与电子工程学院, 山东 淄博 255000)

摘要:以采用主从控制的柔性直流配电系统为研究对象,从时域角度提出了直流电压时间尺度下柔性直流配电系统的高阶数学模型,引入阻抗系数对数学模型进行了降阶处理。通过对降阶数学模型的分析,研究了子模块电容、子模块个数等电路参数与控制参数对振荡频率的影响,揭示了柔性直流配电系统低频振荡机理。最后,通过MATLAB/Simulink搭建了基于模块化多电平换流器(MMC)的柔性直流配电系统仿真模型,仿真结果验证了理论分析的正确性。

关键词:模块化多电平换流器;柔性直流配电系统;直流电压时间尺度;降阶模型;二阶微分方程;低频振荡

中图分类号:TM 712;TM 727

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202103016

0 引言

随着可再生分布式能源、电力电子设备的不断增加,传统的交流配电系统在电能质量、传输容量及系统稳定性等方面的劣势日益明显,相比而言,柔性直流配电系统具有提高新能源利用率、降低成本等优点,在未来电网中将发挥巨大作用^[1-4]。模块化多电平换流器(MMC)已在柔性直流输电系统中得到广泛研究并成功应用,其拓展性好、波形质量高、损耗低等优点使MMC在柔性直流配电系统中具有良好的应用前景^[5-6]。

高比例电力电子设备接入电网使得系统易产生振荡,其中低频振荡问题严重威胁系统的安全稳定运行^[7-8]。针对低频振荡问题,国内外学者开展了研究并取得了一定的进展。文献[9]对低压直流配电系统单母线的谐振机理进行了分析,指出换流器与恒功率负荷级联,产生负阻抗会导致低频振荡现象。文献[10]指出在风电换流器、柔性直流换流器及其控制环节存在耦合作用会引起系统产生稳定性问题,通过建立系统单输入单输出模型,研究发现当风电场输出功率达到额定功率时,互联系统存在低频振荡失稳风险。文献[11]在直流电压时间尺度下,基于运动方程建立了MMC的小信号模型,通过特征值分析研究了影响系统低频振荡的因素。文献[12]研究了柔性直流电网与系统互联时的振荡模态,指出可以通过调节柔性直流系统各换流站的有功功率抑制交流系统的低频振荡。文献[13]通过建立包含整流器、逆变器及其控制的阻抗模型,研究了柔性直流输电系统直流低频振荡现象,研究表明直流线路电容的大小对系统低频振荡影响较大,而与交流系

统不同的是传输功率的等级对系统低频振荡影响较小。目前,学者们大多通过建立系统的状态空间方程,利用特征值分析法进行分析或者将系统等效成电阻、电容和电感串并联的阻抗模型,利用阻抗分析法研究系统的稳定性。

上述文献大多聚焦于讨论系统是否稳定,而较少研究振荡机理,尤其是在时域角度下对低频振荡机理研究得较少。针对以上问题,本文用时域解析法建立了基于MMC的柔性直流配电系统的高阶数学模型,通过引入阻抗系数,分析其低频段的幅频特性实现了数学模型的降阶,获取了系统降阶模型的解析式,分析了子模块(SM)电容、子模块个数等关键参数与振荡频率之间的关系,最后通过仿真验证了理论分析的正确性。

1 系统模型

1.1 MMC简化模型

直流配电系统具有节点多、潮流复杂的特点,与下垂控制相比,采用主从控制策略更易实现直流母线电压的稳定。目前,柔性直流示范工程如上海南汇柔性直流工程、张北直流电网示范性工程、舟山多端柔性直流工程等均采用主从控制,因此本文中也采用主从控制策略。主站采用定直流电压控制,定直流电压控制单元由直流电压外环控制、交流电流内环控制及环流控制构成,起到维持公共直流母线电压稳定的作用;从站采用定功率控制,起到保证传输功率平衡的作用,其对外呈现负阻抗^[14]。

本文所研究的系统简化模型如图1所示,负荷以级联的形式通过公共直流母线实现与换流器的互联。图中, u_{sa} 、 u_{sb} 和 u_{sc} 为交流电源三相电压; L_{ac} 为交流线路等效电感; i_{ode} 为流入负荷的直流电流; i_{kp} 、 i_{kn} 分别为 $k(k=a,b,c)$ 相上、下桥臂电流; N 为单个桥臂中子模块级联数目; R_s 、 L_s 分别为桥臂等效电阻、电感; U_{dc} 为直流电压。

收稿日期:2020-12-14;修回日期:2021-01-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51807112)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51807112)

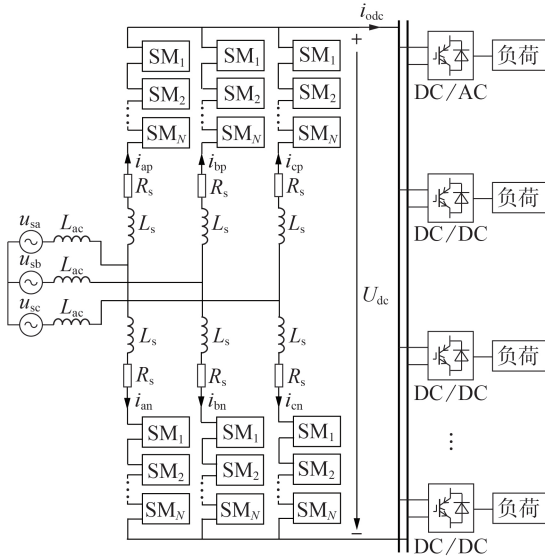


图1 柔性直流配电系统简化模型

Fig.1 Simplified model of flexible DC distribution system

MMC的内部动态过程十分复杂,而研究整个系统的稳定性时不需要分析换流器内部动态特性,只需要考虑MMC模块对于换流器所连接网络的外特性^[15],因此采用平均值建模的方法^[16],可以得出MMC直流电压的表达式为:

$$U_{dc} = \sum_{k=a,b,c} \frac{u_{kp} + u_{kn}}{3} - \frac{2R_s}{3} i_{odec} - \frac{2L_s}{3} \dot{i}_{odec} \quad (1)$$

其中, u_{kp} 、 u_{kn} 分别为 k 相上、下桥臂电压。

MMC 每相有 $2N$ 个子模块,正常工作时投入的子模块数为 N 。采用电容电压均衡算法,可以认为各子模块电容电压均衡良好。在考虑桥臂等效电阻与电感的情况下,从换流器直流端口得到等效模型如附录中图 A1 所示。文献[17]采用图 A1 所示的模型以张北直流示范工程为例分析了影响系统稳定性的因素。

目前,有学者依据电力电子设备控制器的响应速度对系统存在的多时间尺度进行了划分,可分为机电时间尺度、直流电压时间尺度和交流电流时间尺度^[18]。其中,由机械转子、无功功率引起的振荡问题属于机电时间尺度;由直流电压、端电压引起的振荡问题属于直流电压时间尺度;由电流控制器引起的振荡问题属于交流电流时间尺度。根据以上时间尺度的划分可以大幅简化所研究的动态问题。在经典的矢量控制中,MMC 主要包含直流电压时间尺度(振荡频率在 10 Hz 左右)和交流电流时间尺度(振荡频率在 100 Hz 左右),本文研究的是在直流电压时间尺度下的低频振荡问题,可以认为在交流电流时间尺度下较快的控制过程已经完成指令跟踪。同时对于 MMC 而言,为了改善输出波形,还会增加环流抑制控制器,环流抑制控制器同属于交流电流时

间尺度^[19],因此可以将其忽略。锁相环的主要作用为动态获取交流侧电压、电流相位信息,实现网侧有功、无功功率控制,而本文主要针对直流侧部分进行研究,且由于忽略电流内环动态变量,故锁相环部分的动态过程对于本文的研究并无影响。依据上述分析可以建立系统的控制框图如附录中图 A2 所示。

1.2 负荷模型

在柔性直流配电系统中,大部分直流负荷、分布式电源、基于电力电子装置的接口都具有恒功率特性^[20],可将其视为通用恒功率负荷(G-CPL),其模型如附录中图 A3 所示。

1.3 柔性直流配电系统等效模型

一般地,桥臂电阻值较小,可以近似认为 R_s 的值为 0,将桥臂等效电感外移,即将 MMC 等效电容电压作为直流电压的反馈点,通过附录中图 A1 和图 A3 可以得到柔性直流配电系统的等效模型如图 2 所示。图中, i_d 为换流器等效输出直流电流; C_{eq} 为等效电容,即 $C_{eq} = 6C/N$, C 为子模块电容值; R 为线路等效电阻; L 为桥臂等效电感与线路等效电感之和; R_l 和 C_l 分别为 G-CPL 等效电阻和电容。

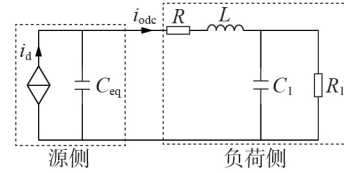


图2 柔性直流配电系统等效模型

Fig.2 Equivalent model of flexible DC distribution system

2 系统降阶数学模型

2.1 数学模型的建立

根据所建立的柔性直流配电系统等效模型及其控制框图,可以得到如下表达式:

$$\Delta U = U_{dcref} - U_{dc} \quad (2)$$

$$i_d = \Delta U \left(k_p + \frac{k_i}{s} \right) \quad (3)$$

$$i_{dc} = \mu i_d - i_{odec} \quad (4)$$

$$U_{dc} = \frac{i_{dc} N}{s \times 6C} \quad (5)$$

$$U_{dc} = i_{odec} \frac{R_l + (R + sL)(1 + sC_l R_l)}{1 + sC_l R_l} \quad (6)$$

其中, U_{dcref} 为直流电压参考值; k_p 和 k_i 分别为电压外环的比例系数和积分系数; μ 为换流器输入输出电压变换系数; s 为拉普拉斯算子。

联立式(2)~(6)可以得到关于直流电压 U_{dc} 的方程为:

$$\begin{aligned}
& \frac{6C_1R_1LC}{N} \frac{d^3U_{dc}}{dt^3} + \left[\frac{6(C_1R_1R+L)C}{N} + \mu C_1R_1Lk_p \right] \frac{d^2U_{dc}}{dt^2} + \\
& \left[\frac{6(R_1+R)C}{N} + C_1R_1 + \mu C_1R_1Lk_i + \mu(C_1R_1R+L)k_p \right] \frac{dU_{dc}}{dt} + \\
& \mu(R_1+R)k_i \int_{t_1}^{t_2} U_{dc} dt + \left[1 + \mu(C_1R_1R+L)k_i + \right. \\
& \left. \mu(R_1+R)k_p \right] U_{dc} = \mu C_1R_1Lk_p \frac{d^2U_{dcref}}{dt^2} + \\
& \mu \left[C_1R_1Lk_i + (C_1R_1R+L)k_p \right] \frac{dU_{dcref}}{dt} + \\
& \mu \left[(C_1R_1R+L)k_i + (R_1+R)k_p \right] U_{dcref} + \\
& \mu(R_1+R)k_i \int_{t_1}^{t_2} U_{dcref} dt
\end{aligned} \quad (7)$$

其中, t_1 、 t_2 为积分时间。由于式(7)中含有一重积分项, 所以对该式求一阶导数, 由此得到关于直流电压 U_{dc} 的四阶微分方程, 如式(8)所示。

$$\begin{aligned}
& \frac{6C_1R_1LC}{N} \frac{d^4U_{dc}}{dt^4} + \left[\frac{6(C_1R_1R+L)C}{N} + \mu C_1R_1Lk_p \right] \frac{d^3U_{dc}}{dt^3} + \\
& \left[\frac{6(R_1+R)C}{N} + C_1R_1 + \mu C_1R_1Lk_i + \mu(C_1R_1R+L)k_p \right] \frac{d^2U_{dc}}{dt^2} + \\
& \left[1 + \mu(C_1R_1R+L)k_i + \mu(R_1+R)k_p \right] \frac{dU_{dc}}{dt} + \\
& \mu(R_1+R)k_i U_{dc} = \mu C_1R_1Lk_p \frac{d^3U_{dcref}}{dt^3} + \\
& \mu \left[C_1R_1Lk_i + (C_1R_1R+L)k_p \right] \frac{d^2U_{dcref}}{dt^2} + \\
& \mu \left[(C_1R_1R+L)k_i + (R_1+R)k_p \right] \frac{dU_{dcref}}{dt} + \\
& \mu(R_1+R)k_i U_{dcref}
\end{aligned} \quad (8)$$

根据四阶微分方程获得的振荡频率解析式非常复杂, 使得振荡频率计算十分困难, 且难以对关键参数与振荡频率之间的关系进行讨论, 下面考虑对系统模型进行降阶。

2.2 降阶数学模型

在负荷侧引入阻抗系数^[21], 令其为 $\alpha(s)$, 并进行如图3所示的变换, 阻抗系数 $\alpha(s)$ 为:

$$\alpha(s) = \frac{R_1}{C_1R_1Ls^2 + (C_1R_1R+L)s + R_1 + R} \quad (9)$$

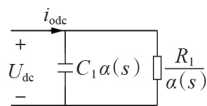


图3 引入 $\alpha(s)$ 的 G-CPL 等效模型

Fig.3 G-CPL equivalent model with $\alpha(s)$

对 $\alpha(s)$ 的幅频特性进行分析, 如图4所示。不

难得到在低频段(即直流电压时间尺度)可以将 $\alpha(s)$ 近似等效为1, 即线路阻抗、桥臂电感以及 G-CPL 单元的电容对低频振荡的影响很小, 可以忽略。需要说明的是, 这在后续的仿真算例中进行了验证。

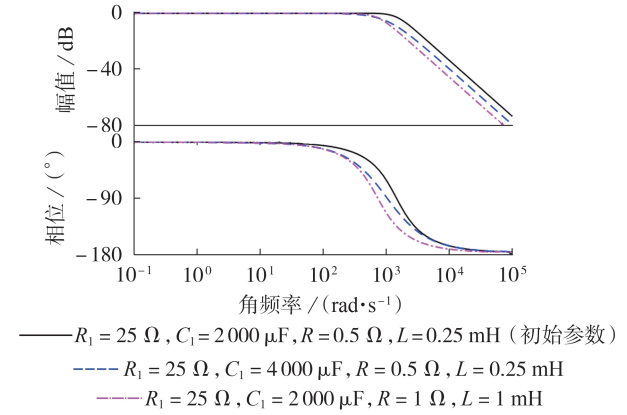


图4 $\alpha(s)$ 幅频特性

Fig.4 Amplitude-frequency characteristics of $\alpha(s)$

根据上述分析可以将柔性直流配电系统的等效模型进行进一步化简, 得到如图5所示的简化模型。图中, C_{sum} 为换流器等效电容与 G-CPL 电容并联后的等效电容, 即 $C_{sum} = C_1 + 6C/N$ 。从而使关于直流电压 U_{dc} 的微分方程实现降阶, 便于进行理论分析。

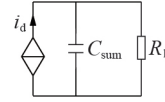


图5 柔性直流配电系统的降阶模型

Fig.5 Reduced-order model of flexible DC distribution system

根据柔性直流配电系统的降阶模型和所构建的控制框图可以得到关于直流电压 U_{dc} 的二阶微分方程如式(10)所示。

$$\left(C_1 + \frac{6C}{N} \right) \frac{d^2U_{dc}}{dt^2} + \left(\mu k_p + \frac{1}{R_1} \right) \frac{dU_{dc}}{dt} + \mu k_i U_{dc} = \mu k_i U_{dcref} \quad (10)$$

令其特征方程为:

$$a\lambda^2 + b\lambda + c = 0 \quad (11)$$

$$\begin{cases} a = C_1 + \frac{6C}{N} \\ b = \mu k_p + \frac{1}{R_1} \\ c = \mu k_i \end{cases} \quad (12)$$

振荡频率 ω 与所构建特征方程共轭复根的虚部有关, 当判别式 $\Delta = b^2 - 4ac < 0$ 时, 特征方程有1对共轭复根并发生振荡现象, 得到振荡频率 ω 的表达式如式(13)所示。

$$\omega = \frac{\sqrt{4ac - b^2}}{2a} \quad (13)$$

3 低频振荡机理分析

根据第2节分析得到的振荡频率 ω 的表达式,进一步得到其解析式如式(14)所示,下面对其解析式中的参数进行定量分析研究。

$$\omega = \sqrt{\frac{4\mu k_i C_1 + \frac{24\mu k_i C}{N} - \left(\mu k_p + \frac{1}{R_1}\right)^2}{4\left(C_1 + \frac{6C}{N}\right)^2}} \quad (14)$$

根据式(14)绘出各关键参数对系统振荡频率的影响曲线如附录中图A4所示。柔性直流配电系统源侧、负荷侧基本参数分别如附录中表A1和表A2所示。

3.1 子模块电容值对振荡频率的影响

以 C 为自变量,根据振荡频率的解析式(式(14)),通过其偏导数 ω'_C 的正负分析振荡频率与子模块电容值之间的关系。决定两者关系的关键方程如式(15)所示。

$$\omega'_C = \frac{-\frac{36\mu k_i}{N}C - 6\mu k_i C_1 + \left(\mu k_p + \frac{1}{R_1}\right)^2}{N\left(\frac{6C}{N} + C_1\right)^3} \quad (15)$$

不难看出式(15)中的分子为关于 C 的一次方程,分母为关于 C 的三次方程。考虑到 C 的实际意义,可以得到 $C > 0$ 。在此区间内,依据附录中表A1与表A2的数据可判断 ω'_C 的值为负,因此可以得到低频振荡频率与子模块电容成负相关。从附录中图A4(a)还可以得到,低频振荡频率变化幅度随子模块电容值的增大而减小。

3.2 子模块个数对振荡频率的影响

类似地,以 N 为自变量,根据振荡频率的解析式(式(14)),通过其偏导数 ω'_N 的正负分析振荡频率与子模块个数之间的关系。决定两者关系的关键方程如式(16)所示。

$$\omega'_N = \frac{\left[6\mu k_i C_1 C - \left(\mu k_p + \frac{1}{R_1}\right)^2\right]N + 36\mu k_i C^2}{(C_1 N + 6C)^3} \quad (16)$$

不难得到式(16)由关于 N 的一次方程和三次方程组合而成。考虑到 N 的实际意义,可以得到 $N > 0$ 。在此区间内,依据附录中表A1与表A2的数据可判断 ω'_N 的值为正,因此可以得到低频振荡频率与子模块个数成正相关。同时从附录中图A4(b)还可以得到,当子模块个数逐渐增加时,低频振荡频率变化速度减小。

3.3 外环比例系数对振荡频率的影响

当振荡频率取得极值点时,外环比例系数 k_p^* 为:

$$k_p^* = -\frac{1}{\mu R_1} \quad (17)$$

首先,在数学层面进行分析,将附录中表A1与表A2中数据代入式(17)可得当低频振荡频率取得极值点时,外环比例系数 $k_p^* = -0.0593$,低频振荡频率在 k_p^* 处取得极大值点。当 $k_p < k_p^*$ 时,低频振荡频率随 k_p 的增大而增大;当 $k_p > k_p^*$ 时,低频振荡频率随 k_p 的增大而减小。考虑到实际中 k_p 的取值应大于0,不难得到当 $k_p > 0$ 时,低频振荡频率随 k_p 的增大而减小。由附录中图A4(c)还可以得到,随着外环比例系数的增大,低频振荡频率减小的幅度逐渐增大。

3.4 外环积分系数对振荡频率影响

同理,当外环积分系数满足式(18)时,低频振荡频率与外环积分系数成正相关。

$$k_i > \frac{\left(\mu k_p + \frac{1}{R_1}\right)^2}{4\mu C_1 + \frac{24\mu C}{N}} \quad (18)$$

为验证式(18)的正确性,将附录中表A1与表A2的数据代入可得到当 $k_i > 0.5707$ 时,外环积分系数与低频振荡频率成正相关,且由附录中图A4(d)还可以得到,当外环积分系数不断增大时,低频振荡频率增大的幅度不断减小。

4 仿真实证

为验证本文所分析相关参数与振荡频率之间关系的正确性,在MATLAB/Simulink中搭建了如图1所示的柔性直流配电系统电磁暂态模型,换流器采用直流电压外环、交流电流内环控制的控制策略。

4.1 降阶仿真实证

分别改变初始状态下的直流线路电阻和电感、G-CPL等效电容以及桥臂等效电感的取值,与初始参数下直流电压振荡情况进行对比,仿真结果如图6和附录中图A5所示。

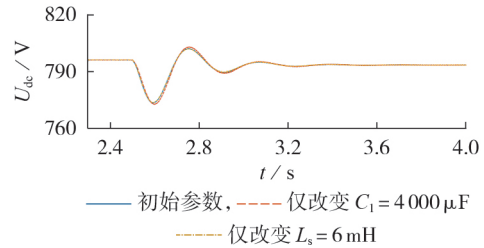


图6 变 C_1 与 L_s 下的直流电压仿真波形

Fig.6 Simulative waveforms of DC voltage with variation of C_1 and L_s

由图6和图A5可知,改变直流线路电阻和电感、G-CPL等效电容以及桥臂等效电感后,系统的振荡频率几乎没有发生变化,即上述参数对系统振荡

频率的影响较小,从而验证了降阶的正确性。

4.2 算例验证

(1)子模块电容对振荡频率的影响。

令其余参数不变,子模块电容值 C 分别取3000、4000、5000 μF 时直流电压的振荡情况如图7所示。图中, T 为振荡周期。

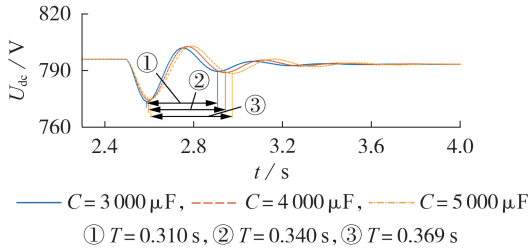


图7 变 C 下的直流电压仿真波形

Fig.7 Simulative waveforms of DC voltage with variation of C

由图7可知,随着子模块电容的增大,其振荡周期随之增大,仿真结果与理论分析结果一致,验证了式(15)的正确性。分别给出振荡频率仿真值和计算值,如表1所示。可以得到两者误差很小,同样证明了式(14)的正确性。

表1 变 C 下的振荡频率对比

Table 1 Comparison of oscillation frequency with variation of C			
$C / \mu\text{F}$	振荡频率 / ($\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$)		误差 / %
	仿真值	计算值	
3000	20.2272	19.9659	1.29
4000	18.4456	18.4210	0.13
5000	16.9912	17.1821	1.12

(2)子模块个数对振荡频率的影响。

令其余参数不变,分别搭建五电平、七电平和九电平电磁暂态仿真模型,得到直流电压的振荡情况如图8所示。

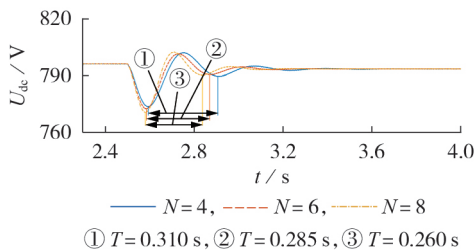


图8 变 N 下的直流电压仿真波形

Fig.8 Simulative waveforms of DC voltage with variation of N

由图8可以得到,随着子模块个数的增大,其直流电压振荡周期随之减小,与理论分析结果一致,验证了式(16)的正确性。分别给出振荡频率仿真值和计算值,如附录中表A3所示,可以得到两者误差很小,同样证明了式(14)的正确性。

(3)外环比例系数对振荡频率的影响。

令其余参数不变,外环比例系数 k_p 分别取0.05、0.15、0.25时直流电压的振荡情况如图9所示。

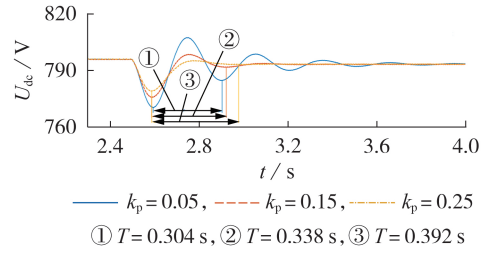


图9 变 k_p 下的直流电压仿真波形

Fig.9 Simulative waveforms of DC voltage with variation of k_p

由图9可知,随着外环比例系数的增大,其振荡周期随之增大,且变化越快,与理论分析结果一致,验证了式(17)的正确性。分别给出振荡频率仿真值和计算值,如附录中表A4所示,可以得到两者误差很小,同样证明了式(14)的正确性。

(4)外环积分系数对振荡频率的影响。

令其余参数不变,外环积分系数 k_i 分别取4、10、16时直流电压的振荡情况如图10所示。

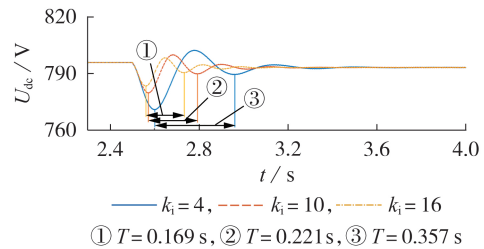


图10 变 k_i 下的直流电压仿真波形

Fig.10 Simulative waveforms of DC voltage with variation of k_i

由图10可知,随着外环积分系数的增大,其振荡周期随之减小,验证了式(18)的正确性。分别给出仿真振荡频率仿真值和计算值,如附录中表A5所示,可以得到两者误差很小,同样证明了式(14)的正确性。

5 结论

本文从时域角度出发,建立了基于MMC的柔性直流配电系统的数学模型,实现了数学模型的降阶,基于降阶数学模型探究了关键参数对系统低频振荡的作用规律,得到如下结论:

(1)电压外环控制参数对系统低频振荡频率影响较大,其中比例系数与低频振荡频率成负相关,积分系数与低频振荡频率成正相关;

(2)MMC子模块电容值对低频振荡频率影响较大,且与低频振荡频率成负相关;

(3)子模块个数对低频振荡频率影响较大,且与低频振荡频率成正相关;

(4)直流线路阻抗、桥臂电感及G-CPL等效电容对低频振荡频率影响较小。

根据本文所建立的解析方程可以更加直观地得到关键参数与系统振荡频率之间的关系,同时对于系统电气参数与控制参数的选择有一定的参考价值。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 孙鹏飞,贺春光,邵华,等. 直流配电网研究现状与发展[J]. 电力自动化设备,2016,36(6):64-73.
SUN Pengfei, HE Chunguang, SHAO Hua, et al. Research status and development of DC distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 64-73.
- [2] 孙谦浩,王裕,宋强,等. 应用于直流配电网的双向全桥直流变换器比较分析[J]. 电力自动化设备,2017,37(10):49-56.
SUN Qianhao, WANG Yu, SONG Qiang, et al. Analysis and comparison of dual-active-bridge DC/DC converters in DC distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(10): 49-56.
- [3] 赵学深,彭克,张新慧,等. 多端柔性直流配电系统主从控制模式下的稳定性与优化控制[J]. 电力自动化设备,2019,39(2):14-20.
ZHAO Xueshen, PENG Ke, ZHANG Xinhui, et al. Stability and optimal control of multi-terminal flexible DC distribution system under master-slave control mode[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(2): 14-20.
- [4] 姚广增,彭克,李海荣,等. 柔性直流配电系统高频振荡降阶模型与机理分析[J]. 电力系统自动化,2020,44(20):29-36.
YAO Guangzeng, PENG Ke, LI Hairong, et al. Reduced-order model and mechanism analysis of high-frequency oscillation for flexible DC distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(20): 29-36.
- [5] ALLEBROD S, HAMERSKI R, MARQUARDT R. New transformerless scalable modular multilevel converters for HVDC-transmission[C]//Power Electronics Specialists Conference, 2008. Rhodes, Greece: IEEE, 2008: 174-179.
- [6] 董云龙,凌卫家,田杰,等. 舟山多端柔性直流输电控制保护系统[J]. 电力自动化设备,2016,36(7):169-175.
DONG Yunlong, LING Weijia, TIAN Jie, et al. Control & protection system for Zhoushan multi-terminal VSC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(7): 169-175.
- [7] 姜齐荣,王玉芝. 电力电子设备高占比电力系统电磁振荡分析与抑制综述[J]. 中国电机工程学报,2020,40(22):7185-7201.
JIANG Qirong, WANG Yuzhi. Overview of the analysis and mitigation methods of electromagnetic oscillations in power systems with high proportion of power electronic equipment[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(22): 7185-7201.
- [8] 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.
- [9] 林刚,李勇,王姿雅,等. 低压直流配电系统谐振机理分析与有源抑制方法[J]. 电网技术,2017,41(10):3358-3366.
LIN Gang, LI Yong, WANG Ziya, et al. Resonance mechanism analysis and active suppression method of low-voltage DC distribution system[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3358-3366.
- [10] 王一凡,赵成勇,郭春义. 直驱风电场与柔直互联系统的传递函数模型及其低频振荡稳定性分析[J]. 中国电机工程学报,2020,40(5):1485-1498.
WANG Yifan, ZHAO Chengyong, GUO Chunyi. Transfer function model and low-frequency stability analysis for PMSG-based wind farm interconnected with flexible-HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(5): 1485-1498.
- [11] HU J, ZHU J, WAN M. Modeling and analysis of modular multilevel converter in DC voltage control timescale[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(8): 6449-6459.
- [12] 倪斌业,向往,鲁晓军,等. 基于状态反馈附加阻尼控制的柔性直流电网抑制低频振荡[J]. 电力自动化设备,2019,39(3):45-50.
NI Binye, XIANG Wang, LU Xiaojun, et al. Low-frequency oscillation suppression using flexible DC grid based on state feedback supplementary damping control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3): 45-50.
- [13] XU L, FAN L, MIAO Z. DC impedance-model-based resonance analysis of a VSC-HVDC system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(3): 1221-1230.
- [14] 马文忠,丁安敏,周冠宇,等. 基于超导储能装置的MMC-HVDC系统直流振荡抑制方法[J]. 电力自动化设备,2020,40(9):184-190, 210.
MA Wenzhong, DING Anmin, ZHOU Guanyu, et al. Superconducting magnetic energy storage device based DC oscillation mitigation method in MMC-HVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(9): 184-190, 210.
- [15] 喻悦箫,刘天琪,王顺亮,等. 基于平均值模型的双端MMC-HVDC系统小信号建模[J]. 中国电机工程学报,2018,38(10):2999-3006.
YU Yuexiao, LIU Tianqi, WANG Shunliang, et al. Small signal modeling of two-terminal MMC-HVDC based on AVM model[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(10): 2999-3006.
- [16] 徐政,屠卿瑞,管敏渊,等. 柔性直流输电系统[M]. 北京:机械工业出版社,2013:73-78.
- [17] 李云丰,汤广福,吴亚楠,等. 直流电网建模分析与阻尼控制研究[J]. 中国电机工程学报,2017,37(12):3372-3382.
LI Yunfeng, TANG Guangfu, WU Yanan, et al. Research on modeling analysis and damping control of DC power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(12): 3372-3382.
- [18] 袁小明,程时杰,胡家兵. 电力电子化电力系统多尺度电压功角动态稳定问题[J]. 中国电机工程学报,2016,36(19):5145-5154, 5395.
YUAN Xiaoming, CHENG Shijie, HU Jiabing. Multi-time scale voltage and power angle dynamics in power electronics dominated large power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19): 5145-5154, 5395.
- [19] 万敏. MMC直流电压时间尺度建模及系统稳定性分析[D]. 武汉:华中科技大学,2018.
WAN Min. Modeling and stability analysis of modular multilevel converter in DC voltage control timescale[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2018.
- [20] 李霞林,王成山,郭力,等. 直流微电网稳定控制关键技术研究综述[J]. 供用电,2015,32(10):1-14.
LI Xialin, WANG Chengshan, GUO Li, et al. Review on key technologies of DC microgrid stability control[J]. Distribution & Utilization, 2015, 32(10): 1-14.

- [21] GUO L, LI P, LI X, et al. Reduced-order modelling and dynamic stability mechanism analysis of MTDC system in DC voltage control timescale[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2020, 6(3): 591-600.

作者简介:

张 浩(1995—),男,山东东营人,硕士研究生,主要研究方向为柔性直流配电系统振荡分析与控制(E-mail: zhang17862327873@126.com);



张 浩

彭 克(1983—),男,山东淄博人,副教授,博士,通信作者,主要研究方向为交直流配电系统与综合能源系统(E-mail: pengke@sdut.edu.cn);

刘盈杞(1997—),女,山东临沂人,硕士研究生,主要研究方向为直流微电网小扰动分析(E-mail: liuyingqi146@163.com)。

(编辑 李玮)

Low-frequency oscillation mechanism analysis of flexible DC distribution system based on MMC

ZHANG Hao, PENG Ke, LIU Yingqi, JIANG Songhan

(College of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China)

Abstract: Taking the master-slave controlled flexible DC distribution system as the research object, the high-order mathematical model of flexible DC distribution system under DC voltage time scale is proposed in time domain. Furthermore, the order of mathematical model is reduced by introducing impedance coefficient. By analyzing the reduced-order mathematical model, the influences of control parameters and circuit parameters, such as the capacitance of sub-module and the sub-module number, on the system oscillation frequency are studied, and the low-frequency oscillation mechanism of flexible DC distribution system is revealed. Finally, a simulation model of flexible DC distribution system based on MMC (Modular Multilevel Converter) is built by MATLAB/Simulink, and the simulative results verify the correctness of theoretical analysis.

Key words: modular multilevel converter; flexible DC distribution system; DC voltage time scale; reduced-order model; second-order differential equation; low-frequency oscillation

附录

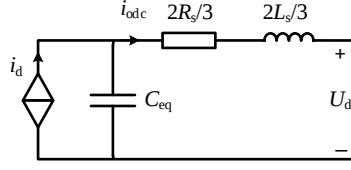


图 A1 MMC 简化等效模型

Fig.A1 Simplified equivalent model of MMC

图 A1 中, i_d 为经双闭环控制后的等效注入受控直流电流源; C_{eq} 为等效电容, 即 $C_{eq} = 6C/N$, C 为子模块电容值。

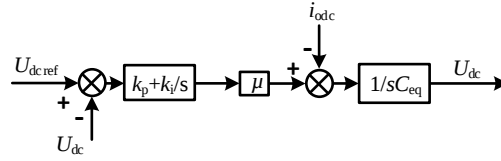


图 A2 定直流电压控制框图

Fig.A2 Block diagram of control for constant DC voltage

图 A2 中, U_{dcref} 为直流电压参考值; k_p 和 k_i 分别为电压外环的比例系数和积分系数; μ 为换流器输入输出电压变换系数; s 为拉普拉斯算子。

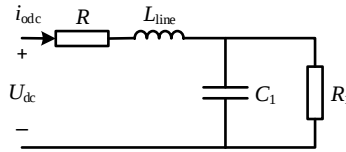


图 A3 G-CPL 等效模型

Fig.A3 G-CPL equivalent model

图 A3 中, R 和 L_{line} 分别为线路等效电阻和电感; R_1 和 C_1 分别为 G-CPL 等效电阻和电容。

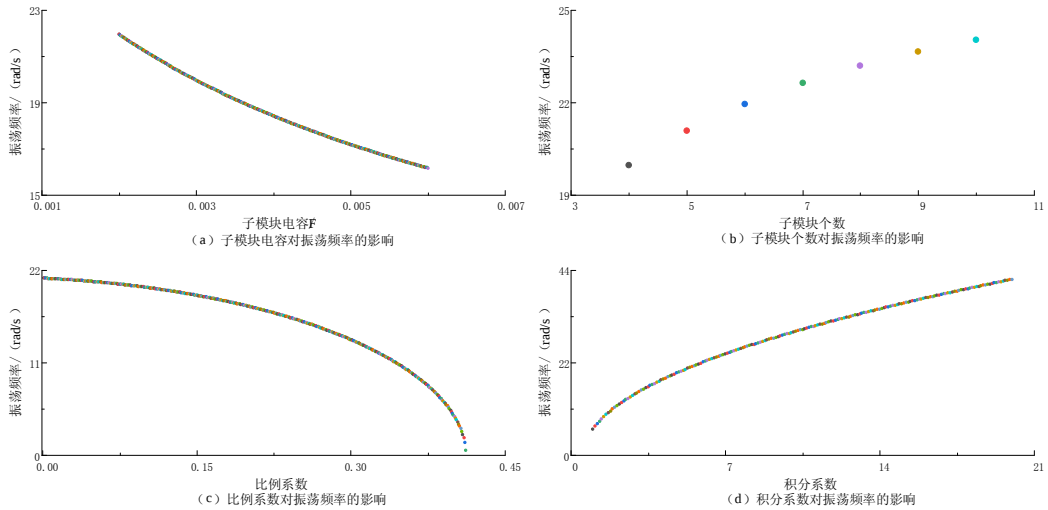


图 A4 关键参数对低频振荡频率的影响

Fig.A4 Effect of key parameters on low-frequency oscillation frequency

表 A1 柔性直流配电系统源侧基本参数

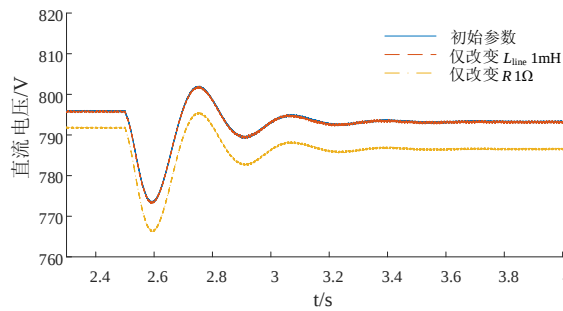
Table A1 Basic parameters of source side for flexible DC distribution system

类型	参数	数值
基本参数	额定交流电压 u_s	380 V
	额定直流电压 U_{dc}	800 V
	桥臂等效电感 L_s	4 mH
	子模块电容 C	3000 μ F
	桥臂子模块个数 N	4
	直流线路电阻 R	0.5 Ω
	直流线路电感 L_{line}	0.25 mH
电压外环	比例/积分系数 (k_p/k_i)	0.1/5
电流内环	比例/积分系数 (k_p/k_i)	2.56/126

表 A2 柔性直流配电系统负荷侧基本参数

Table A2 Basic parameters of load side for flexible DC distribution system

类型	参数	数值
基本参数	DC-DC 低压侧电阻 R_1	25 Ω
	G-CPL 等效电容 C_1	3000 μ F
	额定直流负荷电压 U_{load}	400 V
	滤波电感 L_{load}	4 mH
电压环	比例/积分系数 (k_p/k_i)	0.1/4
电流环	比例/积分系数 (k_p/k_i)	0.25/250

图 A5 变 L_{line} 与 R 直流电压仿真波形Fig.A5 Simulative waveform of DC voltage with variation of L_{line} and R 表 A3 变 N 振荡频率对比Table A3 Comparison of oscillation frequency when changing N

N	振荡频率/ ($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$)		误差/%
	仿真值	计算值	
4	20.2272	19.9659	1.29
6	22.0369	21.9602	0.35
8	24.1112	23.1957	3.79

表 A4 变 k_p 振荡频率对比Table A4 Comparison of oscillation frequency when changing k_p

k_p	振荡频率/ ($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$)		误差/%
	仿真值	计算值	
0.05	20.6147	21.0152	1.94
0.15	18.5556	19.0086	2.44
0.25	16.0238	16.0102	0.09

表 A5 变 k_i 振荡频率对比			
Table A5 Comparison of oscillation frequency when changing k_i			
k_i	振荡频率/ (rad · s ⁻¹)		误差/%
	仿真值	计算值	
4	17.5784	17.5681	0.04
10	28.4331	29.1314	2.46
16	36.9973	37.2644	0.72