

低频输电技术原理之一——M³C 的数学模型 与等效电路

徐 政, 张哲任

(浙江大学 电气工程学院, 杭州 310027)

摘要: 低频海底电缆输电技术在远海风电送出和海上风电场构网方面具有竞争优势, 而 M³C(模块化多电平矩阵变换器)是低频输电技术的核心元件。针对 M³C 的数学模型与等效电路展开研究, 介绍了低频输电技术的发展背景。通过将 M³C 看作为已广泛应用的 MMC(模块化多电平换流器)的结构扩展, 给出了类似于 MMC 的 M³C 拓扑结构和变量命名规则。在此基础上推导出了 M³C 在 abc 三相坐标系中的数学模型, 并在 $\alpha\beta 0$ 坐标系中建立了 M³C 的数学模型, 根据 M³C 在 $\alpha\beta 0$ 坐标系中的数学方程, 推导出了对应的等效电路。

关键词: 低频输电; M³C; abc 坐标系; $\alpha\beta 0$ 坐标系; 数学模型; 等效电路

文章编号: 1007-1881(2021)10-0013-09

DOI: 10.19585/j.zjdl.202110002

中图分类号: TM721

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Principles of Low Frequency Power Transmission Technology: Part 1- Mathematical Model and Equivalent Circuit of M³C

XU Zheng, ZHANG Zheren

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Low-frequency submarine cable power transmission technology has competitive advantage in off-shore wind power transmission and offshore wind farm network construction, and the modular multilevel matrix converter (M³C) is the core component of low-frequency power transmission technology. This paper focuses on the mathematical model and equivalent circuit of the M³C. First, the development context of low-frequency power transmission technology is described. By considering the M³C as an extension of the widely used modular multilevel converter(MMC), the paper introduces M³C topology and variable naming rules which are similar to the MMC. On this basis, the mathematical model of the M³C in the abc coordinate system is derived, and the mathematical model of M³C is established in the $\alpha\beta 0$ coordinate system. According to the mathematical equation of the M³C in the $\alpha\beta 0$ coordinate system, the corresponding equivalent circuit is derived.

Keywords: low-frequency transmission; M³C; abc coordinate system; $\alpha\beta 0$ coordinate system; mathematical model; equivalent circuit

0 引言

随着海上风电开发向深远海方向发展, 近年来海上低频输电技术越来越受到学术界和工业界的关注。对于海底电缆, 采用低频输电方案的根本优势是可以降低电缆的并联电容效应, 从而可以扩展海上交流输电的距离。比如, 对于 220 kV 电压等级, 工频 50 Hz 下的合理输电距离大约为 80 km^[1], 如果海上风电场的离岸距离超过 80 km, 那么可选的输电方案主要是 2 种, 一种是直流输

电方案, 另一种就是低频输电方案。由于直流输电在换流站成本以及构网后的故障开断方面还存在不足, 因此低频输电在远海风电送出以及海上风电场构网方面具有竞争优势。

采用低频方案进行远距离海底电缆输电的设想已有相当长的历史, 至少 1950 年在论证瑞典本土到哥特兰岛的输电方案(输电距离 100 km)时已进行过技术经济比较^[2-3]。当时比较了 25 Hz, $16\frac{2}{3}$ Hz 和直流 3 种方案, 最终还是采用了直流

输电方案。陆上采用低频方案进行远距离大容量架空线路输电的设想是由王锡凡院士在1994年提出的^[4-5]，同样，陆上低频输电方案的主要竞争对手也是直流输电方案。近年来随着电力电子技术的发展，特别是MMC(模块化多电平换流器)技术的发展，低频输电技术已进入到了一个新的发展阶段，其在能源转型和构建新型电力系统方面有可能发挥重要作用。

低频输电方案的一个关键环节是低频系统与工频系统之间的接口，完成此功能的设备被称为变频器。实现变频器的电路拓扑有多种，其中一种具有良好工程应用前景的拓扑结构是M³C(模块化多电平矩阵变流器)。M³C是在2001年提出的^[6-7]，跟MMC为同一年提出^[8]。经过20年来的研究和改进，M³C的理论已趋于成熟，其主要应用在电机调速领域，在高电压大容量输电领域还没有得到实际工程应用。

为了将M³C应用于高电压大容量输电领域，需要解决主回路参数设计、过电压与绝缘配合设计、控制器设计以及设备制造等多方面的技术问题，以往文献对M³C的数学建模和控制策略已有较多研究^[9-13]，但对主回路参数设计、过电压与绝缘配合设计以及控制保护系统设计等涉及较少。本系列文章的目的是系统总结以往文献和本研究团队在M³C数学建模和控制策略等方面已取得的成果，用一种便于理解且步步可追溯的方式将

数学建模、主回路参数设计以及控制器设计的具体过程完整展示出来。期望本系列文章能对理解M³C的运行原理有所帮助。

1 M³C标准结构和变量命名

恰当的主回路结构展示形式和变量命名对于学习和应用M³C技术是十分重要的。对于已接触过MMC技术的读者，采用如图1所示的M³C主回路结构展示形式，而不采用原始的模块化多电平矩阵形主回路结构形式是更合适的。因为采用如图1所示的M³C主回路结构展示形式，就可以把M³C看作是MMC拓扑结构的扩展，而不是一个完全陌生的电路。图1中的M³C主回路结构，可以看作是在MMC的上、下各3个桥臂结构基础上又增加了中间3个桥臂；进而使MMC的从上桥臂公共母线到下桥臂公共母线之间输出直流电压变成了M³C的从上桥臂公共母线、中间桥臂公共母线和下桥臂公共母线输出三相交流电压；进而达到了从输入端三相交流电压到输出端三相交流电压的变换，且这个变换包含了三相电压幅值的变换和三相电压频率的变换；进而达到了交-交变频器的功能。

对于如图1所示的三相M³C拓扑结构，输入侧电气量的下标用大写字母(A, B, C)和字母i表示，输出侧电气量的下标用小写字母(a, b, c)和字母o表示，桥臂电抗器和桥臂子模块的命名规

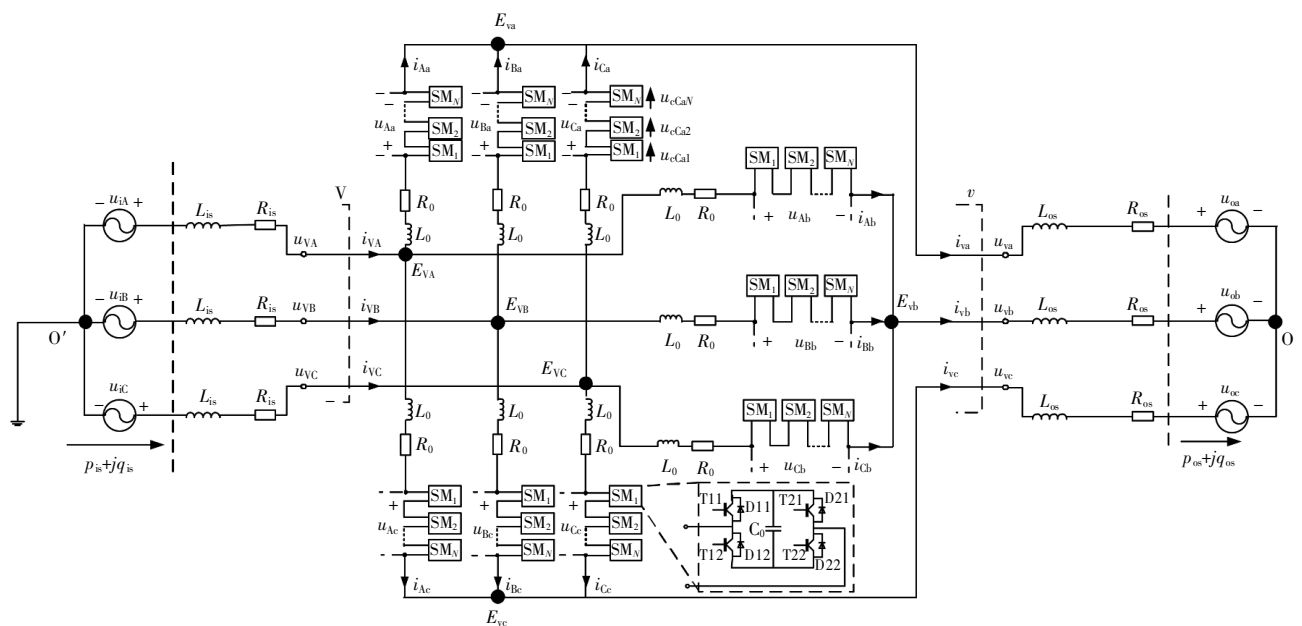


图1 M³C拓扑结构示意图

则采用普遍接受的命名规则^[14], 例如, u_{Ca} 表示桥臂 Ca 上所有子模块合成的电压, 而 u_{cCa1} 表示桥臂 Ca 上第 1 子模块的电容电压。需要特别注意: “V”和“v”是表示位置的符号, “V”表示输入侧的阀侧, “v”表示输出侧的阀侧, 而“ E_{VA} , E_{VB} , E_{VC} ”

表示输入侧各相 3 个桥臂的公共联接点, 而“ E_{va} , E_{vb} , E_{vc} ”表示输出侧各相 3 个桥臂的公共联接点。

2 M³C 的基本数学模型推导

2.1 abc 三相坐标系中的数学模型

根据基尔霍夫电压定律, 可以得到 M³C 微分方程数学模型:

$$\begin{cases} L_0 \frac{di_{Aa}}{dt} + R_0 i_{Aa} + u_{Aa} = -L_{is} \frac{di_{VA}}{dt} - R_{is} i_{VA} + u_{iA} + u_{o'o} - u_{oa} - L_{os} \frac{di_{va}}{dt} - R_{os} i_{va} \\ L_0 \frac{di_{Ab}}{dt} + R_0 i_{Ab} + u_{Ab} = -L_{is} \frac{di_{VA}}{dt} - R_{is} i_{VA} + u_{iA} + u_{o'o} - u_{ob} - L_{os} \frac{di_{vb}}{dt} - R_{os} i_{vb} \\ L_0 \frac{di_{Ac}}{dt} + R_0 i_{Ac} + u_{Ac} = -L_{is} \frac{di_{VA}}{dt} - R_{is} i_{VA} + u_{iA} + u_{o'o} - u_{oc} - L_{os} \frac{di_{vc}}{dt} - R_{os} i_{vc} \\ L_0 \frac{di_{Ba}}{dt} + R_0 i_{Ba} + u_{Ba} = -L_{is} \frac{di_{VB}}{dt} - R_{is} i_{VB} + u_{iB} + u_{o'o} - u_{oa} - L_{os} \frac{di_{va}}{dt} - R_{os} i_{va} \\ L_0 \frac{di_{Bb}}{dt} + R_0 i_{Bb} + u_{Bb} = -L_{is} \frac{di_{VB}}{dt} - R_{is} i_{VB} + u_{iB} + u_{o'o} - u_{ob} - L_{os} \frac{di_{vb}}{dt} - R_{os} i_{vb} \\ L_0 \frac{di_{Bc}}{dt} + R_0 i_{Bc} + u_{Bc} = -L_{is} \frac{di_{VB}}{dt} - R_{is} i_{VB} + u_{iB} + u_{o'o} - u_{oc} - L_{os} \frac{di_{vc}}{dt} - R_{os} i_{vc} \\ L_0 \frac{di_{Ca}}{dt} + R_0 i_{Ca} + u_{Ca} = -L_{is} \frac{di_{VC}}{dt} - R_{is} i_{VC} + u_{iC} + u_{o'o} - u_{oa} - L_{os} \frac{di_{va}}{dt} - R_{os} i_{va} \\ L_0 \frac{di_{Cb}}{dt} + R_0 i_{Cb} + u_{Cb} = -L_{is} \frac{di_{VC}}{dt} - R_{is} i_{VC} + u_{iC} + u_{o'o} - u_{ob} - L_{os} \frac{di_{vb}}{dt} - R_{os} i_{vb} \\ L_0 \frac{di_{Cc}}{dt} + R_0 i_{Cc} + u_{Cc} = -L_{is} \frac{di_{VC}}{dt} - R_{is} i_{VC} + u_{iC} + u_{o'o} - u_{oc} - L_{os} \frac{di_{vc}}{dt} - R_{os} i_{vc} \end{cases} \quad (1)$$

将上面 9 个方程从上到下按行排列成 3×3 的矩阵形式, 有:

$$\begin{aligned} L_0 \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{Aa} & i_{Ab} & i_{Ac} \\ i_{Ba} & i_{Bb} & i_{Bc} \\ i_{Ca} & i_{Cb} & i_{Cc} \end{bmatrix} + R_0 \begin{bmatrix} i_{Aa} & i_{Ab} & i_{Ac} \\ i_{Ba} & i_{Bb} & i_{Bc} \\ i_{Ca} & i_{Cb} & i_{Cc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{Aa} & u_{Ab} & u_{Ac} \\ u_{Ba} & u_{Bb} & u_{Bc} \\ u_{Ca} & u_{Cb} & u_{Cc} \end{bmatrix} = -L_{is} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{VA} & i_{VA} & i_{VA} \\ i_{VB} & i_{VB} & i_{VB} \\ i_{VC} & i_{VC} & i_{VC} \end{bmatrix} - R_{is} \begin{bmatrix} i_{VA} & i_{VA} & i_{VA} \\ i_{VB} & i_{VB} & i_{VB} \\ i_{VC} & i_{VC} & i_{VC} \end{bmatrix} - \\ L_{os} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{va} & i_{vb} & i_{vc} \\ i_{va} & i_{vb} & i_{vc} \\ i_{va} & i_{vb} & i_{vc} \end{bmatrix} - R_{os} \begin{bmatrix} i_{va} & i_{vb} & i_{vc} \\ i_{va} & i_{vb} & i_{vc} \\ i_{va} & i_{vb} & i_{vc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{iA} & u_{iA} & u_{iA} \\ u_{iB} & u_{iB} & u_{iB} \\ u_{iC} & u_{iC} & u_{iC} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_{oa} & u_{ob} & u_{oc} \\ u_{oa} & u_{ob} & u_{oc} \\ u_{oa} & u_{ob} & u_{oc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{o'o} & u_{o'o} & u_{o'o} \\ u_{o'o} & u_{o'o} & u_{o'o} \\ u_{o'o} & u_{o'o} & u_{o'o} \end{bmatrix} \quad (2) \end{aligned}$$

同时, 根据基尔霍夫电流定律, M³C 输入侧交流电流与桥臂电流之间的关系为:

$$\begin{bmatrix} i_{VA} \\ i_{VB} \\ i_{VC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{Aa} \\ i_{Ba} \\ i_{Ca} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{Ab} \\ i_{Bb} \\ i_{Cb} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{Ac} \\ i_{Bc} \\ i_{Cc} \end{bmatrix} \quad (3)$$

定义输入侧共模电压:

$$\begin{bmatrix} u_{sumA} \\ u_{sumB} \\ u_{sumC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{u_{Aa} + u_{Ab} + u_{Ac}}{3} \\ \frac{u_{Ba} + u_{Bb} + u_{Bc}}{3} \\ \frac{u_{Ca} + u_{Cb} + u_{Cc}}{3} \end{bmatrix} \quad (5)$$

M³C 输出侧交流电流与桥臂电流之间的关系为:

$$\begin{bmatrix} i_{va} \\ i_{vb} \\ i_{vc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{Aa} \\ i_{Ab} \\ i_{Ac} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{Ba} \\ i_{Bb} \\ i_{Bc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{Ca} \\ i_{Cb} \\ i_{Cc} \end{bmatrix} \quad (4)$$

定义输出侧共模电压:

$$\begin{bmatrix} u_{\text{coma}} \\ u_{\text{comb}} \\ u_{\text{comc}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{u_{Aa}+u_{Bb}+u_{Cc}}{3} \\ \frac{u_{Ab}+u_{Bb}+u_{Cb}}{3} \\ \frac{u_{Ac}+u_{Bb}+u_{Cc}}{3} \end{bmatrix} \quad (6)$$

2.2 $\alpha\beta 0$ 正交坐标系中的数学模型

由于 abc 三相物理量可以看作是一个旋转空间向量在 abc 3 个静止坐标轴上的投影, 但 abc 3 个静止坐标轴互差 120° , 不是一个正交坐标系, 因而在 abc 三相坐标系中不可能做到三相物理量之间的相互解耦。而对于 M³C 的分析计算和控制器设计, 在各坐标轴物理量相互解耦的坐标系中实施一定是更加简便的。正交坐标系天然就有各坐标轴上物理量相互解耦的特性, 因而就自然想到用正交坐标系来代替 abc 坐标系, 然后基于正交坐标系中的物理量进行计算的思路。这种思路早已被想到, 最著名并被广泛应用的正交坐标系就是 $\alpha\beta 0$ 坐标系, 而从 abc 坐标系到 $\alpha\beta 0$ 坐标系的变换矩阵被称为 Clarke 变换^[15]。利用正交坐标系进行分析的另一个优势是可以使描述数学模型的方程数目减少。在正交坐标系中, 只有相互独立的数学方程会被呈现出来, 不独立的冗余方程自然地会被消去。例如, 对于 abc 三相对称系统,

三相电压和三相电流的零序分量等于零, 这样将三相电压和三相电流变换到 $\alpha\beta 0$ 正交坐标系中后, 只有描述 α 轴和 β 轴物理量的方程是有意义的, 0 轴上的方程是冗余方程, 自然地就消失了, 这样就将描述 abc 三相物理量的 3 个方程减少成为 2 个方程。以下推导 M³C 在 $\alpha\beta 0$ 坐标系中的数学模型。

定义 abc 到 $\alpha\beta 0$ 的变换矩阵 $T_{abc-\alpha\beta 0}$ 为^[16]:

$$T_{abc-\alpha\beta 0} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (7)$$

对应地从 $\alpha\beta 0$ 到 abc 的变换矩阵 $T_{\alpha\beta 0-abc}$ 为:

$$T_{\alpha\beta 0-abc} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (8)$$

注意 $T_{abc-\alpha\beta 0}$ 和 $T_{\alpha\beta 0-abc}$ 为正交矩阵, $(T_{abc-\alpha\beta 0})^{-1} = (T_{\alpha\beta 0-abc})^T$ 。

将输入侧 ABC 坐标系中的各变量变换到 $\alpha\beta 0$ 坐标系, 其变换式如下, 注意矩阵表达式可以按列分开理解。

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha a} & i_{\alpha b} & i_{\alpha c} \\ i_{\beta a} & i_{\beta b} & i_{\beta c} \\ i_{0a} & i_{0b} & i_{0c} \end{bmatrix} = T_{abc-\alpha\beta 0} \begin{bmatrix} i_{Aa} & i_{Ab} & i_{Ac} \\ i_{Ba} & i_{Bb} & i_{Bc} \\ i_{Ca} & i_{Cb} & i_{Cc} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Aa} & i_{Ab} & i_{Ac} \\ i_{Ba} & i_{Bb} & i_{Bc} \\ i_{Ca} & i_{Cb} & i_{Cc} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} u_{\alpha a} & u_{\alpha b} & u_{\alpha c} \\ u_{\beta a} & u_{\beta b} & u_{\beta c} \\ u_{0a} & u_{0b} & u_{0c} \end{bmatrix} = T_{abc-\alpha\beta 0} \begin{bmatrix} u_{Aa} & u_{Ab} & u_{Ac} \\ u_{Ba} & u_{Bb} & u_{Bc} \\ u_{Ca} & u_{Cb} & u_{Cc} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{Aa} & u_{Ab} & u_{Ac} \\ u_{Ba} & u_{Bb} & u_{Bc} \\ u_{Ca} & u_{Cb} & u_{Cc} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} i_{V\alpha} & i_{V\alpha} & i_{V\alpha} \\ i_{V\beta} & i_{V\beta} & i_{V\beta} \\ i_{V0} & i_{V0} & i_{V0} \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{abc-\alpha\beta0} \begin{bmatrix} i_{VA} & i_{VA} & i_{VA} \\ i_{VB} & i_{VB} & i_{VB} \\ i_{VC} & i_{VC} & i_{VC} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{VA} & i_{VA} & i_{VA} \\ i_{VB} & i_{VB} & i_{VB} \\ i_{VC} & i_{VC} & i_{VC} \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} u_{i\alpha} & u_{i\alpha} & u_{i\alpha} \\ u_{i\beta} & u_{i\beta} & u_{i\beta} \\ u_{i0} & u_{i0} & u_{i0} \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{abc-\alpha\beta0} \begin{bmatrix} u_{iA} & u_{iA} & u_{iA} \\ u_{iB} & u_{iB} & u_{iB} \\ u_{iC} & u_{iC} & u_{iC} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{iA} & u_{iA} & u_{iA} \\ u_{iB} & u_{iB} & u_{iB} \\ u_{iC} & u_{iC} & u_{iC} \end{bmatrix}. \quad (12)$$

需注意不要将式(10)中 $u_{0\alpha}$, $u_{0\beta}$, u_{0c} 与图1中 $u_{\alpha\alpha}$, $u_{\alpha\beta}$, $u_{\alpha c}$ 混淆。

而根据式(3)和式(9)有:

$$\begin{bmatrix} i_{V\alpha} \\ i_{V\beta} \\ i_{V0} \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{abc-\alpha\beta0} \begin{bmatrix} i_{VA} \\ i_{VB} \\ i_{VC} \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{abc-\alpha\beta0} \left\{ \begin{bmatrix} i_{Aa} \\ i_{Ba} \\ i_{Ca} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{Ab} \\ i_{Bb} \\ i_{Cb} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{Ac} \\ i_{Bc} \\ i_{Cc} \end{bmatrix} \right\} = \begin{bmatrix} i_{\alpha\alpha} + i_{\alpha\beta} + i_{\alpha c} \\ i_{\beta\alpha} + i_{\beta\beta} + i_{\beta c} \\ i_{0\alpha} + i_{0\beta} + i_{0c} \end{bmatrix}. \quad (13)$$

根据式(5)和式(10)有:

$$\begin{bmatrix} u_{\text{sum}\alpha} \\ u_{\text{sum}\beta} \\ u_{\text{sum}0} \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{abc-\alpha\beta0} \begin{bmatrix} u_{\text{sum}A} \\ u_{\text{sum}B} \\ u_{\text{sum}C} \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{abc-\alpha\beta0} \begin{bmatrix} \frac{u_{Aa} + u_{Ab} + u_{Ac}}{3} \\ \frac{u_{Ba} + u_{Bb} + u_{Bc}}{3} \\ \frac{u_{Ca} + u_{Cb} + u_{Cc}}{3} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} u_{\alpha\alpha} + u_{\alpha\beta} + u_{\alpha c} \\ u_{\beta\alpha} + u_{\beta\beta} + u_{\beta c} \\ u_{0\alpha} + u_{0\beta} + u_{0c} \end{bmatrix}. \quad (14)$$

另外,对于输出侧 abc 坐标系中的各变量,进行 abc 坐标系到 $\alpha\beta0$ 坐标系的变换后,有如下关系式:

$$\mathbf{T}_{abc-\alpha\beta0} \begin{bmatrix} i_{va} & i_{vb} & i_{vc} \\ i_{va} & i_{vb} & i_{vc} \\ i_{va} & i_{vb} & i_{vc} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{va} & i_{vb} & i_{vc} \\ i_{va} & i_{vb} & i_{vc} \\ i_{va} & i_{vb} & i_{vc} \end{bmatrix} = \sqrt{3} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ i_{va} & i_{vb} & i_{vc} \end{bmatrix}, \quad (15)$$

$$\mathbf{T}_{abc-\alpha\beta0} \begin{bmatrix} u_{\alpha\alpha} & u_{\alpha\beta} & u_{\alpha c} \\ u_{\alpha\alpha} & u_{\alpha\beta} & u_{\alpha c} \\ u_{\alpha\alpha} & u_{\alpha\beta} & u_{\alpha c} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{\alpha\alpha} & u_{\alpha\beta} & u_{\alpha c} \\ u_{\alpha\alpha} & u_{\alpha\beta} & u_{\alpha c} \\ u_{\alpha\alpha} & u_{\alpha\beta} & u_{\alpha c} \end{bmatrix} = \sqrt{3} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ u_{\alpha\alpha} & u_{\alpha\beta} & u_{\alpha c} \end{bmatrix}, \quad (16)$$

$$\mathbf{T}_{abc-\alpha\beta0} \begin{bmatrix} u_{\alpha'o} & u_{\alpha'o} & u_{\alpha'o} \\ u_{\alpha'o} & u_{\alpha'o} & u_{\alpha'o} \\ u_{\alpha'o} & u_{\alpha'o} & u_{\alpha'o} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{\alpha'o} & u_{\alpha'o} & u_{\alpha'o} \\ u_{\alpha'o} & u_{\alpha'o} & u_{\alpha'o} \\ u_{\alpha'o} & u_{\alpha'o} & u_{\alpha'o} \end{bmatrix} = \sqrt{3} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ u_{\alpha'o} & u_{\alpha'o} & u_{\alpha'o} \end{bmatrix}. \quad (17)$$

在式(2)两侧左乘 $T_{abc-\alpha\beta 0}$ 可以得到:

$$(L_0 \frac{d}{dt} + R_0) \begin{bmatrix} i_{\alpha a} & i_{\alpha b} & i_{\alpha c} \\ i_{\beta a} & i_{\beta b} & i_{\beta c} \\ i_{0a} & i_{0b} & i_{0c} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{\alpha a} & u_{\alpha b} & u_{\alpha c} \\ u_{\beta a} & u_{\beta b} & u_{\beta c} \\ u_{0a} & u_{0b} & u_{0c} \end{bmatrix} = -(L_{is} \frac{d}{dt} + R_{is}) \begin{bmatrix} i_{V\alpha} & i_{V\alpha} & i_{V\alpha} \\ i_{V\beta} & i_{V\beta} & i_{V\beta} \\ i_{V0} & i_{V0} & i_{V0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{i\alpha} & u_{i\alpha} & u_{i\alpha} \\ u_{i\beta} & u_{i\beta} & u_{i\beta} \\ u_{i0} & u_{i0} & u_{i0} \end{bmatrix} - \sqrt{3} (L_{os} \frac{d}{dt} + R_{os}) \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ i_{va} & i_{vb} & i_{vc} \end{bmatrix} - \sqrt{3} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ u_{\alpha a} & u_{\alpha b} & u_{\alpha c} \end{bmatrix} + \sqrt{3} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ u_{o'o} & u_{o'o} & u_{o'o} \end{bmatrix}. \quad (18)$$

将式(18)拆分成描述输入侧关系和输出侧关系的2个方程,描述输入侧关系的方程为:

$$(L_0 \frac{d}{dt} + R_0) \begin{bmatrix} i_{\alpha a} & i_{\alpha b} & i_{\alpha c} \\ i_{\beta a} & i_{\beta b} & i_{\beta c} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{\alpha a} & u_{\alpha b} & u_{\alpha c} \\ u_{\beta a} & u_{\beta b} & u_{\beta c} \end{bmatrix} = -(L_{is} \frac{d}{dt} + R_{is}) \begin{bmatrix} i_{V\alpha} & i_{V\alpha} & i_{V\alpha} \\ i_{V\beta} & i_{V\beta} & i_{V\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{i\alpha} & u_{i\alpha} & u_{i\alpha} \\ u_{i\beta} & u_{i\beta} & u_{i\beta} \end{bmatrix}. \quad (19)$$

描述输出侧关系的方程为:

$$(L_0 \frac{d}{dt} + R_0) \begin{bmatrix} i_{0a} \\ i_{0b} \\ i_{0c} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{0a} \\ u_{0b} \\ u_{0c} \end{bmatrix} = -(L_{is} \frac{d}{dt} + R_{is}) \begin{bmatrix} i_{V0} \\ i_{V0} \\ i_{V0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{i0} \\ u_{i0} \\ u_{i0} \end{bmatrix} - \sqrt{3} (L_{os} \frac{d}{dt} + R_{os}) \begin{bmatrix} i_{va} \\ i_{vb} \\ i_{vc} \end{bmatrix} - \sqrt{3} \begin{bmatrix} u_{\alpha a} \\ u_{\alpha b} \\ u_{\alpha c} \end{bmatrix} + \sqrt{3} \begin{bmatrix} u_{o'o} \\ u_{o'o} \\ u_{o'o} \end{bmatrix}. \quad (20)$$

由式(9)知:

$$\begin{bmatrix} i_{0a} \\ i_{0b} \\ i_{0c} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} i_{va} \\ i_{vb} \\ i_{vc} \end{bmatrix}. \quad (21)$$

由式(10)知:

$$\begin{bmatrix} u_{0a} \\ u_{0b} \\ u_{0c} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} u_{Aa} + u_{Bb} + u_{Cc} \\ u_{Ab} + u_{Bb} + u_{Cb} \\ u_{Ac} + u_{Bc} + u_{Cc} \end{bmatrix} = \sqrt{3} \begin{bmatrix} \frac{u_{Aa} + u_{Bb} + u_{Cc}}{3} \\ \frac{u_{Ab} + u_{Bb} + u_{Cb}}{3} \\ \frac{u_{Ac} + u_{Bc} + u_{Cc}}{3} \end{bmatrix} = \sqrt{3} \begin{bmatrix} u_{coma} \\ u_{comb} \\ u_{comc} \end{bmatrix}. \quad (22)$$

则式(20)可以变为:

$$(L_0 \frac{d}{dt} + R_0) \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} i_{va} \\ i_{vb} \\ i_{vc} \end{bmatrix} + \sqrt{3} \begin{bmatrix} u_{coma} \\ u_{comb} \\ u_{comc} \end{bmatrix} = -(L_{is} \frac{d}{dt} + R_{is}) \begin{bmatrix} i_{V0} \\ i_{V0} \\ i_{V0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{i0} \\ u_{i0} \\ u_{i0} \end{bmatrix} - \sqrt{3} (L_{os} \frac{d}{dt} + R_{os}) \begin{bmatrix} i_{va} \\ i_{vb} \\ i_{vc} \end{bmatrix} - \sqrt{3} \begin{bmatrix} u_{\alpha a} \\ u_{\alpha b} \\ u_{\alpha c} \end{bmatrix} + \sqrt{3} \begin{bmatrix} u_{o'o} \\ u_{o'o} \\ u_{o'o} \end{bmatrix}. \quad (23)$$

整理后有:

$$[(L_0 + 3L_{os}) \frac{d}{dt} + (R_0 + 3R_{os})] \begin{bmatrix} i_{va} \\ i_{vb} \\ i_{vc} \end{bmatrix} + 3 \begin{bmatrix} u_{coma} \\ u_{comb} \\ u_{comc} \end{bmatrix} = -\sqrt{3} (L_{is} \frac{d}{dt} + R_{is}) \begin{bmatrix} i_{V0} \\ i_{V0} \\ i_{V0} \end{bmatrix} + \sqrt{3} \begin{bmatrix} u_{i0} \\ u_{i0} \\ u_{i0} \end{bmatrix} - 3 \begin{bmatrix} u_{\alpha a} \\ u_{\alpha b} \\ u_{\alpha c} \end{bmatrix} + 3 \begin{bmatrix} u_{o'o} \\ u_{o'o} \\ u_{o'o} \end{bmatrix}. \quad (24)$$

将输出侧 abc 坐标系中的各变量变换到 $\alpha\beta 0$ 坐标系,得到:

$$\begin{bmatrix} i_{v\alpha} \\ i_{v\beta} \\ i_{v0} \end{bmatrix} = T_{abc-\alpha\beta 0} \begin{bmatrix} i_{va} \\ i_{vb} \\ i_{vc} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{va} \\ i_{vb} \\ i_{vc} \end{bmatrix}, \quad (25)$$

$$\begin{bmatrix} u_{\text{com}\alpha} \\ u_{\text{com}\beta} \\ u_{\text{com}0} \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{abc-\alpha\beta 0} \begin{bmatrix} u_{\text{com}a} \\ u_{\text{com}b} \\ u_{\text{com}c} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{\text{com}a} \\ u_{\text{com}b} \\ u_{\text{com}c} \end{bmatrix}, \quad (26)$$

$$\begin{bmatrix} u_{\alpha c} \\ u_{\alpha\beta} \\ u_{\alpha 0} \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{abc-\alpha\beta 0} \begin{bmatrix} u_{\alpha a} \\ u_{\alpha b} \\ u_{\alpha c} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{\alpha a} \\ u_{\alpha b} \\ u_{\alpha c} \end{bmatrix}. \quad (27)$$

在式(24)两侧左乘 $\mathbf{T}_{abc-\alpha\beta 0}$ 可以得到:

$$[(L_0+3L_{os})\frac{d}{dt}+(R_0+3R_{os})] \begin{bmatrix} i_{v\alpha} \\ i_{v\beta} \\ i_{v0} \end{bmatrix} + 3 \begin{bmatrix} u_{\text{com}\alpha} \\ u_{\text{com}\beta} \\ u_{\text{com}0} \end{bmatrix} = -3(L_{is}\frac{d}{dt}+R_{is}) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ i_{v0} \end{bmatrix} + 3 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ u_{i0} \end{bmatrix} - 3 \begin{bmatrix} u_{\alpha c} \\ u_{\alpha\beta} \\ u_{\alpha 0} \end{bmatrix} + 3\sqrt{3} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ u_{\alpha'0} \end{bmatrix}. \quad (28)$$

若输入和输出系统三相对称,则有 $i_{v0}=0, u_{i0}=0, i_{\alpha 0}=0, u_{\alpha 0}=0$, 根据式(28)的最后一行有:

$$u_{\text{com}0} = \sqrt{3} \cdot u_{\alpha'0}. \quad (29)$$

此外,根据式(14)和式(26)的最后一行以及式(22)的关系,可以得到 $u_{\text{sum}0} = u_{\text{com}0}$, 从而得到:

$$u_{\text{sum}0} = u_{\text{com}0} = \sqrt{3} \cdot u_{\alpha'0}. \quad (30)$$

去掉式(28)的最后一行后,式(28)可以降阶为:

$$[(L_0+3L_{os})\frac{d}{dt}+(R_0+3R_{os})] \begin{bmatrix} i_{v\alpha} \\ i_{v\beta} \end{bmatrix} + 3 \begin{bmatrix} u_{\text{com}\alpha} \\ u_{\text{com}\beta} \end{bmatrix} = -3 \begin{bmatrix} u_{\alpha c} \\ u_{\alpha\beta} \end{bmatrix}. \quad (31)$$

再将式(19)按列拆分成3个方程:

$$(L_0\frac{d}{dt}+R_0) \begin{bmatrix} i_{\alpha a} \\ i_{\beta a} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{\alpha a} \\ u_{\beta a} \end{bmatrix} = -(L_{is}\frac{d}{dt}+R_{is}) \begin{bmatrix} i_{v\alpha} \\ i_{v\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{i\alpha} \\ u_{i\beta} \end{bmatrix}, \quad (32)$$

$$(L_0\frac{d}{dt}+R_0) \begin{bmatrix} i_{\alpha b} \\ i_{\beta b} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{\alpha b} \\ u_{\beta b} \end{bmatrix} = -(L_{is}\frac{d}{dt}+R_{is}) \begin{bmatrix} i_{v\alpha} \\ i_{v\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{i\alpha} \\ u_{i\beta} \end{bmatrix}, \quad (33)$$

$$(L_0\frac{d}{dt}+R_0) \begin{bmatrix} i_{\alpha c} \\ i_{\beta c} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{\alpha c} \\ u_{\beta c} \end{bmatrix} = -(L_{is}\frac{d}{dt}+R_{is}) \begin{bmatrix} i_{v\alpha} \\ i_{v\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{i\alpha} \\ u_{i\beta} \end{bmatrix}. \quad (34)$$

将式(32)、式(33)、式(34)相加有:

$$(L_0\frac{d}{dt}+R_0) \begin{bmatrix} i_{\alpha a}+i_{\alpha b}+i_{\alpha c} \\ i_{\beta a}+i_{\beta b}+i_{\beta c} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{\alpha a}+u_{\alpha b}+u_{\alpha c} \\ u_{\beta a}+u_{\beta b}+u_{\beta c} \end{bmatrix} = -3(L_{is}\frac{d}{dt}+R_{is}) \begin{bmatrix} i_{v\alpha} \\ i_{v\beta} \end{bmatrix} + 3 \begin{bmatrix} u_{i\alpha} \\ u_{i\beta} \end{bmatrix}. \quad (35)$$

根据式(13)和式(14),式(35)变为:

$$[(L_0+3L_{is})\frac{d}{dt}+(R_0+3R_{is})] \begin{bmatrix} i_{v\alpha} \\ i_{v\beta} \end{bmatrix} + 3 \begin{bmatrix} u_{\text{sum}\alpha} \\ u_{\text{sum}\beta} \end{bmatrix} = 3 \begin{bmatrix} u_{i\alpha} \\ u_{i\beta} \end{bmatrix}. \quad (36)$$

分别将式(33)、式(34)减去式(32),并且定义:

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha c}-i_{\alpha a} \\ i_{\beta c}-i_{\beta a} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{\alpha\text{cir}2} \\ i_{\beta\text{cir}2} \end{bmatrix}, \quad (39)$$

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha b}-i_{\alpha a} \\ i_{\beta b}-i_{\beta a} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{\alpha\text{cir}1} \\ i_{\beta\text{cir}1} \end{bmatrix}, \quad (37)$$

$$\begin{bmatrix} u_{\alpha c}-u_{\alpha a} \\ u_{\beta c}-u_{\beta a} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{\alpha\text{cir}2} \\ u_{\beta\text{cir}2} \end{bmatrix}, \quad (40)$$

$$\begin{bmatrix} u_{\alpha b}-u_{\alpha a} \\ u_{\beta b}-u_{\beta a} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{\alpha\text{cir}1} \\ u_{\beta\text{cir}1} \end{bmatrix}, \quad (38)$$

式(37)~(40)中, $i_{\alpha\text{cir}1}$ 和 $i_{\beta\text{cir}1}$ 被称为环流1的 $\alpha\beta$ 分量; $i_{\alpha\text{cir}2}$ 和 $i_{\beta\text{cir}2}$ 被称为环流2的 $\alpha\beta$ 分量; $u_{\alpha\text{cir}1}$

和 $u_{\beta\text{cir}1}$ 被称为环流电压 1 的 $\alpha\beta$ 分量; $u_{\alpha\text{cir}2}$ 和 $u_{\beta\text{cir}2}$ 被称为环流电压 2 的 $\alpha\beta$ 分量。

从而可以得到描述环流特性的微分方程为:

$$(L_0 \frac{d}{dt} + R_0) \begin{bmatrix} i_{\alpha\text{cir}1} \\ i_{\beta\text{cir}1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{\alpha\text{cir}1} \\ u_{\beta\text{cir}1} \end{bmatrix} = 0 \quad (41)$$

$$(L_0 \frac{d}{dt} + R_0) \begin{bmatrix} i_{\alpha\text{cir}2} \\ i_{\beta\text{cir}2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{\alpha\text{cir}2} \\ u_{\beta\text{cir}2} \end{bmatrix} = 0 \quad (42)$$

显然,环流特性只由 M³C 内部的桥臂电压和桥臂电抗决定,与 M³C 的输入侧和输出侧没有直接关系。

式(30)、式(31)、式(36)、式(41)和式(42)构成了对称运行时 M³C 在 $\alpha\beta$ 坐标系中的 9 阶数学模型,后面的相关分析和控制器设计将主要基于这个 9 阶数学模型进行。

3 M³C 的等效电路推导

根据在 $\alpha\beta$ 坐标系中描述输入侧和输出侧动态特性的微分方程式(36)和式(31),可以得到:

$$(L_{i\Sigma} \frac{d}{dt} + R_{i\Sigma}) \begin{bmatrix} i_{V\alpha} \\ i_{V\beta} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} u_{\text{sum}\alpha} \\ u_{\text{sum}\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{i\alpha} \\ u_{i\beta} \end{bmatrix} \quad (43)$$

$$(L_{o\Sigma} \frac{d}{dt} + R_{o\Sigma}) \begin{bmatrix} i_{V\alpha} \\ i_{V\beta} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} u_{\text{com}\alpha} \\ u_{\text{com}\beta} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_{o\alpha} \\ u_{o\beta} \end{bmatrix} \quad (44)$$

其中,

$$\begin{cases} L_{i\Sigma} = L_{is} + \frac{L_0}{3} \\ L_{o\Sigma} = L_{os} + \frac{L_0}{3} \end{cases} \quad (45)$$

$$\begin{cases} R_{i\Sigma} = R_{is} + \frac{R_0}{3} \\ R_{o\Sigma} = R_{os} + \frac{R_0}{3} \end{cases} \quad (46)$$

可以得到 $\alpha\beta$ 坐标系中描述 M³C 输入侧和输出侧特性的等效电路如图 2 所示。

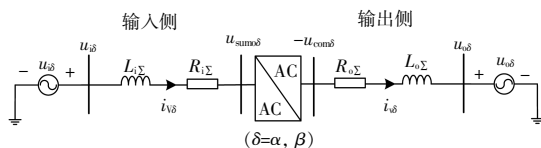


图 2 $\alpha\beta$ 坐标系中描述 M³C 输入侧和输出侧特性的等效电路

同样,根据在 $\alpha\beta$ 坐标系中描述环流特性的微分方程式(41)和式(42),可以得到 $\alpha\beta$ 坐标系

中描述 M³C 环流特性的等效电路如图 3 所示。

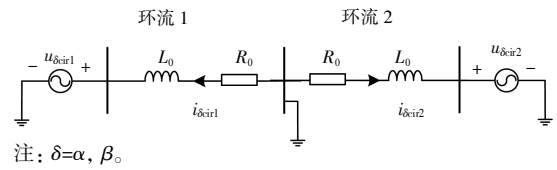


图 3 $\alpha\beta$ 坐标系中描述 M³C 环流特性的等效电路

4 结语

本文针对低频输电中的关键设备 M³C,给出了一种方便学习和应用的主回路拓扑结构展示形式和变量命名规则,推导了 M³C 的完整数学模型和 M³C 在 $\alpha\beta$ 坐标系中等效电路,可以为后续的 M³C 主回路参数设计以及控制器设计奠定基础。

参考文献:

- [1] 蔡蓉,张立波,程濛,等.66 kV 海上风电交流集电方案技术经济性研究[J].全球能源互联网,2019,2(2):155-162.
- [2] ADAMSON C, HINGORANI N G. High voltage direct current power transmission[M]. London: Garraway Limited, 1960.
- [3] RUSK A, RATHSMAN B G, GLIMSTEDT U. The HVDC power transmission from Swedish mainland to the Swedish island of Gotland[C]. CIGRE Report No. 406, 1950.
- [4] WANG X F. The fractional frequency transmission system [C]. IEE Japan Power & Energy, Tokyo, Japan, IEE, 1994: 53-58.
- [5] 王锡凡. 分频输电系统[J]. 中国电力, 1995, 28(1): 2-6.
- [6] ERICKSON R W, AL-NASEEM O A. A new family of matrix converters[C]. 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, November 29 - December 2, 2001, Denver, USA: 1515-1520.
- [7] ANGKITTRAKUL S, ERICKSON R W. Capacitor voltage balancing control for a modular matrix converter[C]. Twenty-First Annual IEEE Conference and Exposition on Applied Power Electronics, Dallas, TX: IEEE, 2006: 1659-1665.
- [8] MARQUARDT R. Stromrichterschaltungen mit verteilten energiespeichern[P]. German Patent. DE10103031A1. 2001-01-24.
- [9] KAMMERER F, KOLB J, BRAUN M. A novel cascaded vector control scheme for the Modular Multilevel Matrix Converter[C]. 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, Melbourne: IEEE, 2011: 1097-1102.
- [10] KAMMERER F, KOLB J, BRAUN M. Fully decoupled current control and energy balancing of the modular

- multilevel matrix converter[C].15th international conference on Power Electronics and Motion Control.Novi Sad, Serbia:IEEE,2012:LS2a.3-1-LS2a.3-8.
- [11] KAWAMURA W,AKAGI H.Control of the modular multilevel cascade converter based on triple-star bridge-cells (MMCC-TSBC) for motor drives[C].IEEE Energy Conversion Congress and Exposition.Raleigh,USA:IEEE,2012:3506-3513.
- [12] KAWAMURA W,HAGIWARA M,AKAGI H.Control and experiment of a modular multilevel cascade converter based on triple-star bridge cells(MMCC-TSBC)[J].IEEE Transactions on Industry Applications,2014,50(5):3536-3548.
- [13] 孟永庆,王健,李磊,等.基于双 dq 坐标变换的 M³C 变换器的数学模型及控制策略研究[J].中国电机工程学报,2016,36(17):4702-4712.
- [14] 徐政,肖晃庆,张哲任.柔性直流输电系统[M].2 版.北京:机械工业出版社,2017.
- [15] CLARKE E.Circuit Analysis of A-C Power Systems,Vol. I—Symmetrical and Related Components,Wiley,1943.
- [16] AKAGI H,WATANABE E H,AREDES M.瞬时功率理论及其在电力调节中的应用[M].徐政译.北京:机械工业出版社,2009:35-39.
-
- 收稿日期:2021-08-23;修回日期:2021-09-17
- 作者简介:徐 政(1962),男,博士,教授,博士生导师,IEEE Fellow,主要研究方向为大规模交直流电力系统分析、直流输电与柔性交流输电、新能源并网、电力谐波与电能质量。
- (本文编辑:徐 晗)