

双馈风力发电系统 电磁暂态分析

◎欧阳金鑫·熊小伏 著



科学出版社

双馈风力发电系统电磁暂态分析

欧阳金鑫 熊小伏 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书较系统地阐述了含双馈风电机组的电力系统故障暂态的过程、特征及其分析方法,介绍了一种基于空间矢量的电力系统暂态分析方法,以及在电网对称和不对称故障下双馈风电系统的暂态过程、输出特性及其物理机理;给出了电网故障下双馈风电机组运行参量的解析关系及其计算方法、含双馈风电机组的电力系统故障计算的等值模型与方法以及大规模双馈机群的电磁暂态特性及其等值建模方法。本书可为现代电力系统的运行控制与保护的研究与实施提供一定的参考。

本书适合从事风电产品、新能源、继电保护装置研发、生产制造和运行管理及电力系统保护与控制等领域学习和研究的高校师生、科研人员和工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

双馈风力发电系统电磁暂态分析 / 欧阳金鑫,熊小伏著. — 北京:科学出版社, 2018.8

ISBN 978-7-03-058615-5

I. ①双… II. ①欧… ②熊… III. ①双馈电机-风力发电系统-暂态特性-研究 IV. ①TM614

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 198330 号

责任编辑:冯 铂 黄 桥 / 责任校对:彭 映

责任印制:罗 科 / 封面设计:墨创文化

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

成都锦瑞印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年8月第一版 开本:787×1092 1/16

2018年8月第一次印刷 印张:14

字数:330千字

定价:108.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

在能源危机和环境问题的驱动下，风力发电成为电力系统的主要发展方向之一，风电装机容量占电网发电容量的比例不断增加。以双馈感应风力发电机组(以下简称“双馈风电机组”)为代表的变速恒频机组是风力发电的主要装备。双馈风电机组采用异步发电机，并利用具有快速调控能力的电力电子变流器实现转子交流励磁，是一种与同步发电机完全异构的电源形态；在电网故障冲击下的能量转换机理、调控模式、暂态响应等方面，均表现出与同步发电机很大的差异，对电力系统的安全运行造成较大的影响。

电力系统暂态分析是掌握电力系统故障下运行参量变化特征、获取设备及系统暂态行为及其物理解释的主要手段，是电力系统规划设计、运行控制和故障保护的基础。双馈风电机组的规模化应用不仅使得电力系统的故障暂态特性发生变化，也使得已有以同步发电机为基础的电力系统暂态分析方法与理论难以适用于风电电力系统。建立适用新型电力系统强耦合性、高可控性和时变非线性特点的电力系统暂态分析方法与理论已成为电力系统运行和发展的关键。

本书试图系统地阐述双馈风电系统的故障暂态特性及其分析方法，其中介绍一种适用于联立电磁暂态过程与电力电子调控过程的基于空间矢量的电力系统暂态分析方法以及双馈风电系统在电网对称和不对称故障下不同故障穿越方式时的暂态过程、特征与物理机理；给出电网故障下双馈风电机组运行参量的解析关系及其计算方法、含双馈风电机组的电力系统故障计算的等值建模方法以及大规模双馈风电电力系统的电磁暂态特性及其等值建模方法。本书可供电力企业从事新能源发电、电力系统运行与控制的技术人员使用，也可为研究院所、高等院校科研人员、研究生提供参考。

本书主要为本人近年研究工作的总结，其中得到了国家自然科学基金资助项目(批准号：51407017)、博士后基金资助项目(批准号：2013M542260)以及重庆大学“输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室”的资助；在研究工作中得到了熊小伏教授的帮助；此外，郑迪、齐晓光、唐挺、张涵轶等研究生均对本书有较多贡献，在此一并表示感谢。

由于新能源发电是电力系统面临的新现象和新问题，其故障暂态涉及较复杂非线性电磁、控制耦合过程，目前相关的理论基础和方法还较为欠缺，再加上作者水平有限，书中不乏错误和不妥之处，欢迎广大读者不吝赐教。

作者

2018年2月

目 录

第 1 章 基于空间矢量的电力系统暂态分析	1
1.1 空间矢量的内涵	1
1.1.1 三相坐标系下的空间矢量	1
1.1.2 同步旋转坐标系下的空间矢量	2
1.1.3 相量的内涵与扩展	3
1.2 空间矢量的特点	4
1.2.1 空间矢量与相量	4
1.2.2 空间矢量与序分量	6
1.2.3 非工频空间矢量	8
1.2.4 非工频正负序矢量	10
1.3 电力系统元件的矢量表示	13
1.3.1 电阻元件	13
1.3.2 电感元件	16
1.3.3 电容元件	17
1.3.4 基尔霍夫定律的矢量表述	18
1.4 电力系统的正负序矢量表示	20
1.4.1 电阻元件	20
1.4.2 电感元件	21
1.4.3 电容元件	22
1.5 空间矢量在电力系统分析中的应用	23
1.5.1 对称短路分析	23
1.5.2 不对称短路分析	25
第 2 章 双馈风电机组的原理与动态模型	29
2.1 双馈风电机组的运行原理	29
2.1.1 双馈风电机组的基本结构	29
2.1.2 双馈风电机组的运行特性	30
2.2 风力机数学模型	32
2.2.1 风力机气动特性	32
2.2.2 机械轴系模型	34
2.3 双馈发电机的电磁暂态模型	35
2.3.1 三相静止坐标系下的瞬时值模型	35

2.3.2	同步旋转坐标系下的瞬时值模型	37
2.3.3	三相静止坐标系下的矢量模型	40
2.3.4	同步旋转坐标系下的正负序矢量模型	41
2.4	双馈风电机组变流器及其数学模型	42
2.4.1	双馈风电机组变流器结构	42
2.4.2	开关函数描述的变流器模型	44
2.4.3	占空比形式的变流器模型	46
2.4.4	同步旋转坐标系下变流器模型	47
第3章	双馈风电机组暂稳态控制及其建模	50
3.1	双馈风电机组机械控制	50
3.1.1	桨距角控制	50
3.1.2	最大功率跟踪控制	51
3.2	理想电网条件下双馈发电机组控制	52
3.2.1	变流器控制的参考坐标系	52
3.2.2	转子侧变流器控制	53
3.2.3	电网侧变流器控制	56
3.3	非理想电网条件下双馈发电机组控制	58
3.3.1	低电压穿越及其实现	58
3.3.2	发电机转子保护	59
3.3.3	无功功率输出控制	61
3.3.4	负序分量控制	61
3.4	计及控制的双馈风电机组暂态模型	62
3.4.1	电压跌落初瞬阶段	62
3.4.2	变流器闭锁阶段	64
3.4.3	Crowbar 投入阶段	64
3.4.4	低电压穿越控制阶段	64
第4章	计及转子保护的双馈感应风电机组暂态分析	66
4.1	常规感应发电机的故障特性	66
4.1.1	三相对称短路	66
4.1.2	不对称短路	68
4.2	带 Crowbar 运行的双馈发电机对称故障特性	70
4.2.1	定子磁链	70
4.2.2	转子磁链	72
4.2.3	定子电流	74
4.3	带 Crowbar 运行的双馈发电机不对称故障特性	75
4.3.1	定子磁链	75
4.3.2	转子磁链	77
4.3.3	定子电流	78

4.4	Crowbar 保护对双馈发电机故障特性的影响	79
4.4.1	Crowbar 电阻的影响	79
4.4.2	Crowbar 电阻设计	82
第 5 章	计及转子励磁控制下双馈感应风电机组暂态分析	85
5.1	定子侧对称故障特性	85
5.1.1	转子绕组电磁暂态过程	85
5.1.2	变流器暂态响应特性	88
5.1.3	转子短路电流	90
5.1.4	定子短路电流	92
5.2	定子侧非对称故障特性	93
5.2.1	负序电磁暂态过程	93
5.2.2	变流器负序响应特性	95
5.2.3	转子负序短路电流	96
5.2.4	定子负序短路电流	97
5.3	转子励磁控制的影响	98
5.3.1	转子侧变流器暂态模型	98
5.3.2	网侧变流器暂态模型	100
5.3.3	基于内模控制的 PI 参数设计	101
5.3.4	不同控制方式下暂态过程	102
5.3.5	控制方式对短路电流的影响	105
5.3.6	仿真分析	107
5.4	转子励磁回路故障特性	113
5.4.1	定转子绕组电磁暂态过程	113
5.4.2	变流器直流母线暂态特性	114
5.4.3	网侧变流器交流暂态特性	116
5.4.4	仿真分析	118
第 6 章	双馈风电机组故障暂态输出特性	125
6.1	双馈发电机暂态输出特殊性	125
6.1.1	短路电流的受限性	125
6.1.2	短路电流多态性	127
6.2	双馈发电机短路电流低次谐波特性	130
6.2.1	短路电流谐波产生机理	130
6.2.2	对称短路电流低次谐波特征	133
6.2.3	非对称短路电流低次谐波特征	137
6.2.4	仿真分析	141
6.3	双馈发电机组机端电压特性	144
6.3.1	稳态运行时机端电压解析表达式	144
6.3.2	电网短路下机端电压解析表达式	145

6.3.3	双馈发电机暂态电压支撑特性	146
6.3.4	仿真分析	148
第7章	含双馈异步风力发电机的电力系统短路电流实用计算	152
7.1	电压非深度对称跌落下的短路电流计算	152
7.1.1	双馈发电机组短路电流解析分析	152
7.1.2	短路电流工频交流分量初始值和稳态值计算	157
7.1.3	仿真分析	158
7.2	电压非深度不对称跌落下的短路电流计算	165
7.2.1	非深度不对称短路定子电流的特性	165
7.2.2	仿真分析	167
7.3	低电压穿越全过程的短路电流计算	171
7.3.1	Crowbar 对机端电压的影响	171
7.3.2	Crowbar 投入对定子磁链的影响	172
7.3.3	Crowbar 投入对转子电流的影响	173
7.3.4	转子侧变流器无功控制对机端电压的影响	174
7.3.5	短路电流计算方法	175
7.3.6	仿真分析	176
第8章	电网电压跌落下双馈式风电机群暂态分析	183
8.1	电压深度跌落下双馈发电机暂态相关性	183
8.1.1	双馈发电机单机矢量等效	183
8.1.2	双馈发电机多机矢量等效	186
8.1.3	双馈发电机相互影响特征	186
8.1.4	仿真分析	188
8.2	电压非深度跌落下双馈发电机暂态相关性	193
8.2.1	故障初期双馈发电机相互影响	193
8.2.2	故障初期双馈发电机多机交互	195
8.2.3	故障持续阶段双馈发电机多机交互	196
8.2.4	仿真分析	199
8.3	双馈风电场电磁暂态过程等值建模	205
8.3.1	双馈发电机暂态相关性指标	205
8.3.2	轨迹结构相似度指标	206
8.3.3	暂态同调机群聚类	208
8.3.4	暂态同调机群聚合	209
8.3.5	仿真分析	211
参考文献		215
附录		216

第 1 章 基于空间矢量的电力系统暂态分析

1.1 空间矢量的内涵

1.1.1 三相坐标系下的空间矢量

矢量是既有大小又有方向的量，在物理学中一般称作矢量，在数学中称作向量。矢量是矢量空间的基本构成元素，矢量空间是满足一系列法则的元素的集合。在线性代数中，矢量的模和方向均保持不变的称为常矢。然而，在实际问题中，常会遇到模或者方向均发生改变的矢量，在矢量分析与场论中，这种矢量被称为变矢。

当存在数性变量 ξ 和变矢 \mathbf{Y} ，若对于 ξ 在一定范围 G 内的每个数值， \mathbf{Y} 都有一个确定的矢量与之对应，则称 \mathbf{Y} 为 ξ 的矢性函数，并称 G 为矢性函数 $\mathbf{Y}(\xi)$ 的定义域。矢性函数与数性函数之间具有一一对应的关系，对于 $Oxyz$ 轴坐标系，矢量函数 $\mathbf{Y}(\xi)$ 的表达式为

$$\mathbf{Y} = (Y_x \mathbf{i} + Y_y \mathbf{j} + Y_z \mathbf{k}) \quad (1.1)$$

式中， \mathbf{i} 、 \mathbf{j} 、 \mathbf{k} 分别为三个坐标轴 x 、 y 、 z 的正向单位矢量； Y_x 、 Y_y 、 Y_z 为矢性函数 \mathbf{Y} 在坐标轴 x 、 y 、 z 上的投影，同样是数性变量 ξ 的函数：

$$Y_x = Y_x(\xi), \quad Y_y = Y_y(\xi), \quad Y_z = Y_z(\xi) \quad (1.2)$$

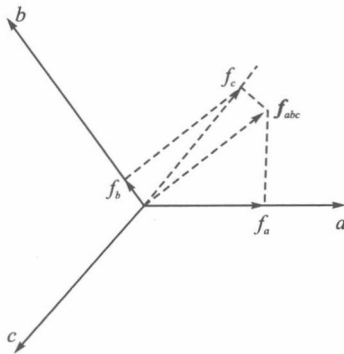


图 1.1 三相静止坐标系下的空间矢量

在电力系统中,三相电气量可视为矢性函数在 abc 三相坐标轴上的投影,该矢性函数即为综合矢量,也称为空间矢量。三相电气量与综合矢量的合成关系如图 1.1 所示。 abc 三相坐标轴的正向单位矢量分别为

$$\mathbf{e}_a = 1, \quad \mathbf{e}_b = \mathbf{a} = \mathbf{e}^{j\frac{2\pi}{3}}, \quad \mathbf{e}_c = \mathbf{a}^2 = \mathbf{e}^{-j\frac{2\pi}{3}} \quad (1.3)$$

电力系统中电压、电流、磁链等电气量的瞬时值均为时间 t 的函数,记作 $f_a(t)$ 、 $f_b(t)$ 、 $f_c(t)$ 。所以,三相电气量 $f_a(t)$ 、 $f_b(t)$ 、 $f_c(t)$ 合成的空间矢量可以定义为

$$\mathbf{f}_{abc}(t) = \frac{2}{3} [f_a(t) + f_b(t)\mathbf{e}_b + f_c(t)\mathbf{e}_c] \quad (1.4)$$

式中,下标 abc 表示三相坐标系下的电气量;下标 a 、 b 、 c 分别表示 a 相、 b 相和 c 相电气量。

1.1.2 同步旋转坐标系下的空间矢量

发电机转子的旋转和凸极效应造成同步发电机方程中存在大量变化的参数,给分析和计算带来了很大的困难。为了解决这个问题,通常根据同步发电机的双反应理论,把发电机定子 abc 三相绕组经过适当变换而等值成 2 个分别固定在 d 、 q 轴上并与转子同步旋转的等值绕组。以定子 d 、 q 绕组为坐标轴所形成的坐标系称为同步旋转坐标系。同步旋转坐标系的 d 、 q 轴单位矢量可以写为

$$\mathbf{e}_d = 1, \quad \mathbf{e}_q = \mathbf{j} \quad (1.5)$$

根据空间矢量的定义,同步旋转坐标系下的空间矢量可以写为

$$\mathbf{f}_{dq}(t) = \frac{2}{3} [f_d(t) + f_q(t)\mathbf{e}_q] \quad (1.6)$$

式中,下标 dq 表示同步旋转坐标系下的空间矢量;下标 d 、 q 分别表示 d 轴和 q 轴分量。

根据经典派克变换, d 轴和 q 轴分量与三相电气量存在如下关系:

$$\begin{bmatrix} f_d(t) \\ f_q(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega_s t + \theta_a) & \cos(\omega_s t + \theta_a - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega_s t + \theta_a + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\omega_s t + \theta_a) & -\sin(\omega_s t + \theta_a - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega_s t + \theta_a + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a(t) \\ f_b(t) \\ f_c(t) \end{bmatrix} \quad (1.7)$$

式中, ω_s 为同步角速度; θ_a 为同步旋转坐标系 d 轴超前于 a 相轴的初始角度。

将式 (1.6) 代入式 (1.7),可以得到同步旋转坐标系下的空间矢量为

$$\begin{aligned} \mathbf{f}_{dq}(t) &= \frac{2}{3} \left[\cos(\omega_s t + \theta_a) f_a(t) + \cos\left(\omega_s t + \theta_a - \frac{2\pi}{3}\right) f_b(t) + \cos\left(\omega_s t + \theta_a + \frac{2\pi}{3}\right) f_c(t) \right] \\ &\quad - \mathbf{j} \frac{2}{3} \left[\sin(\omega_s t + \theta_a) f_a(t) - \sin\left(\omega_s t + \theta_a - \frac{2\pi}{3}\right) f_b(t) - \sin\left(\omega_s t + \theta_a + \frac{2\pi}{3}\right) f_c(t) \right] \quad (1.8) \\ &= \frac{2}{3} \left[f_a(t) \mathbf{e}^{-\mathbf{j}(\omega_s t + \theta_a)} + f_b(t) \mathbf{e}^{-\mathbf{j}\left(\omega_s t + \theta_a - \frac{2\pi}{3}\right)} + f_c(t) \mathbf{e}^{-\mathbf{j}\left(\omega_s t + \theta_a + \frac{2\pi}{3}\right)} \right] = \mathbf{f}_{abc}(t) \mathbf{e}^{-\mathbf{j}(\omega_s t + \theta_a)} \end{aligned}$$

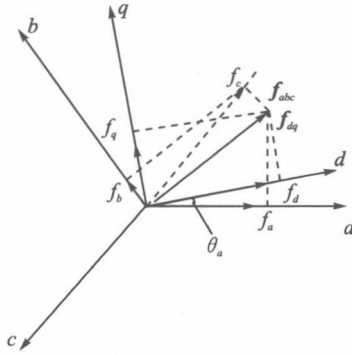


图 1.2 同步旋转坐标系下的空间矢量

同步旋转坐标系下空间矢量 $f_{dq}(t)$ 与三相坐标系下空间矢量 $f_{abc}(t)$ 的关系如图 1.2 所示, 二者的空间分布完全相同, 仅仅由于坐标系位置的不同而具有相角的差别, 这与经典派克变换的等值条件一致。空间矢量 $f_{abc}(t)$ 相对三相静止坐标系逆时针旋转, 但是空间矢量 $f_{dq}(t)$ 相对于同步旋转坐标系而言保持静止。

1.1.3 相量的内涵与扩展

相量是一个复数, 用于特指一定的正弦稳态电气量。根据欧拉公式, 以时间 t 为变量的工频余弦函数 $f_{co}(t)$ 、正弦函数 $f_{si}(t)$ 与复指数函数之间存在以下关系:

$$\begin{cases} F_{m, fu} e^{j(\omega t + \varphi)} = f_{co, fu}(t) + j f_{si, fu}(t) \\ f_{co, fu}(t) = F_{m, fu} \cos(\omega_s t + \varphi_{fu}) = \text{Re} \left[F_{m, fu} e^{j(\omega_s t + \varphi_{fu})} \right] \\ f_{si, fu}(t) = F_{m, fu} \sin(\omega_s t + \varphi_{fu}) = \text{Im} \left[F_{m, fu} e^{j(\omega_s t + \varphi_{fu})} \right] \end{cases} \quad (1.9)$$

式中, Re 表示对复数取实部; Im 表示对复数取虚部; 下标 fu 表示稳态工频的电气量; φ 、 F_m 分别表示正弦函数、余弦函数的初相角和幅值。

根据电路原理可知^[1]: 对复指数函数激励下的响应取实部, 等于以其实部作为激励所得到的响应; 对复指数函数激励下的响应取虚部, 则等于以其虚部作为激励所得到的响应。换言之, 当需要计算网络对余弦激励 $f_{co, fu}(t)$ 的响应时, 可先求网络对复指数激励 $F_{m, fu} e^{j(\omega_s t + \varphi)}$ 的响应, 再对其取实部。

通过复指数函数激励来计算网络的响应可以避免烦琐的三角函数运算。另外, 正弦稳态电路任意位置的电压、电流均含有 $e^{j\omega t}$ 因子, 该因子对于计算而言是多余的, 因此可以忽略。所以, 余弦激励 $f_{co, fu}(t)$ 的 a 相幅值相量 $\dot{F}_{a, fu}(\omega)$ 定义为

$$\dot{F}_{a, fu}(\omega) = F_{m, fu} e^{j\varphi_{fu}} \quad (1.10)$$

相量的模为余弦量的幅值, 幅角等于余弦量的初相。相量与复平面的矢量一一对应, 如图 1.3 所示。

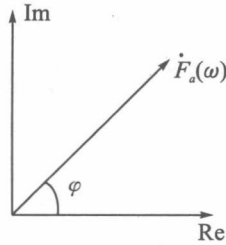


图 1.3 相量图

需要注意的是,相量本身没有物理意义,只是表示余弦量的复数,并不等于余弦量。另外,相量法要求网络中所有余弦量的频率相等且均为 ω_s ,且由于忽略了 $e^{j\omega_s t}$ 因子,所以相量与时间无关,是一种频域分析方法,仅能用于分析工频稳态系统。

从相量的定义可以发现,相量被用于特指稳态的三相工频电气量,其原因在于相量中忽略的因子 $e^{j\omega_s t}$ 在复平面的旋转速度为工频对应的同步速。对于任意频率的非工频暂态电气量,仍然与复指数函数的实部存在一一对应的关系:

$$f_x(t) = F_x e^{-\tau_x t} \cos(\omega_x t + \varphi_x) = \text{Re}\{F_x e^{-\tau_x t} e^{j\omega_x t} e^{j\varphi_x}\} \quad (1.11)$$

式中, F_x 、 τ_x 、 φ_x 分别表示频率为 ω_x 的非工频暂态电气量 $f_x(t)$ 的初始幅值、衰减时间常数和初相角。

同样地,网络任意位置的非工频暂态电压、电流均含有因子 $e^{j\omega_s t}$,在计算中仍然是多余的,因此可以忽略。所以,可以定义非稳态非工频瞬时电气量 $f_x(t)$ 的 a 相相量为

$$\dot{F}_{a,x} = F_{m,x} e^{-\tau_x t} e^{j\varphi_x} \quad (1.12)$$

而, $f_{a,x}(t) = \text{Re}\{\dot{F}_{a,x} e^{j\omega_s t}\}$ 。

本书中仍然沿用电路理论中大写字母加上标点的方式表示相量。但是,此处 \dot{F}_x 的定义打破了传统工频稳态相量的频率约束,且 \dot{F}_x 是与时间有关的量,能够反映不同频率的非稳态电气量随时间的变化规律,因此具有更广阔的应用范围。

1.2 空间矢量的特点

1.2.1 空间矢量与相量

对于稳定运行的三相对称电力系统,三相电气量是随时间变化的正弦函数,其幅值和频率相等,相角互差 120° ,可分别写为余弦函数形式:

$$\begin{cases} f_{a,\text{fu}}(t) = F_{m,\text{fu}} \cos(\omega_s t + \varphi_{\text{fu}}) \\ f_{b,\text{fu}}(t) = F_{m,\text{fu}} \cos\left(\omega_s t + \varphi_{\text{fu}} - \frac{2\pi}{3}\right) \\ f_{c,\text{fu}}(t) = F_{m,\text{fu}} \cos\left(\omega_s t + \varphi_{\text{fu}} + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (1.13)$$

所以，三相工频稳态电气量 $f_{a,\text{fu}}(t)$ 、 $f_{b,\text{fu}}(t)$ 、 $f_{c,\text{fu}}(t)$ 的空间合成矢量可写为

$$\mathbf{f}_{abc,\text{fu}}(t) = \frac{2}{3} F_{m,\text{fu}} \left[\cos(\omega_s t + \varphi_{\text{fu}}) + \cos\left(\omega_s t + \varphi_{\text{fu}} - \frac{2\pi}{3}\right) \mathbf{e}_b + \cos\left(\omega_s t + \varphi_{\text{fu}} + \frac{2\pi}{3}\right) \mathbf{e}_c \right] \quad (1.14)$$

利用欧拉公式，三相坐标系下的空间矢量 $\mathbf{f}_{abc,\text{fu}}(t)$ 可以化简为

$$\begin{aligned} \mathbf{f}_{abc,\text{fu}}(t) &= \frac{2F_{m,\text{fu}}}{3} \left[\frac{e^{j(\omega_s t + \varphi_{\text{fu}})} + e^{-j(\omega_s t + \varphi_{\text{fu}})}}{2} \right] + \frac{2F_{m,\text{fu}} e^{j\frac{2\pi}{3}}}{3} \left[\frac{e^{j(\omega_s t + \varphi_{\text{fu}} - \frac{2\pi}{3})} + e^{-j(\omega_s t + \varphi_{\text{fu}} - \frac{2\pi}{3})}}{2} \right] \\ &\quad + \frac{2F_{m,\text{fu}} e^{-j\frac{2\pi}{3}}}{3} \left[\frac{e^{j(\omega_s t + \varphi_{\text{fu}} + \frac{2\pi}{3})} + e^{-j(\omega_s t + \varphi_{\text{fu}} + \frac{2\pi}{3})}}{2} \right] \\ &= F_{m,\text{fu}} \left[e^{j(\omega_s t + \varphi_{\text{fu}})} + \left(e^{-j(\omega_s t + \varphi_{\text{fu}})} + e^{-j(\omega_s t + \varphi_{\text{fu}} - \frac{2\pi}{3})} + e^{-j(\omega_s t + \varphi_{\text{fu}} + \frac{2\pi}{3})} \right) \right] \\ &= F_{m,\text{fu}} e^{j(\omega_s t + \varphi_{\text{fu}})} = \dot{F}_{a,\text{fu}} e^{j\omega_s t} \end{aligned} \quad (1.15)$$

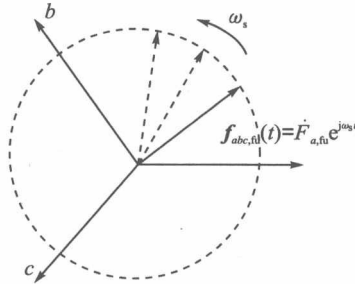


图 1.4 三相静止坐标系下空间矢量与相量的关系

将式(1.15)代入式(1.8)，同步旋转坐标系下的空间矢量可由 a 相相量表示为

$$\mathbf{f}_{dq,\text{fu}}(t) = F_{m,\text{fu}} e^{j\varphi_{\text{fu}}} e^{-j\theta_a} = \dot{F}_{a,\text{fu}} e^{-j\theta_a} \quad (1.16)$$

三相坐标系下的空间矢量 $\mathbf{f}_{abc,\text{fu}}(t)$ 是相量 $\dot{F}_{a,\text{fu}}$ 以同步转速 ω_s 正方向旋转(即逆时针旋转,下同)的矢量,其运动轨迹是以原点为圆心、以幅值 $F_{m,\text{fu}}$ 为半径的圆,如图 1.4 所示。 $\mathbf{f}_{dq,\text{fu}}(t)$ 是相对于同步旋转坐标系的静止矢量,其值等于相量 $\dot{F}_{a,\text{fu}}$ 反方向旋转(即顺时针旋转,下同)角度 θ_a 。当 d 轴与 a 相轴重合时, $\mathbf{f}_{dq,\text{fu}}(t)$ 等于相量 $\dot{F}_{a,\text{fu}}$ 。

根据空间矢量的定义可以看见,尽管同步旋转坐标系下的空间矢量等于工频稳态相量,三相静止坐标系下的空间矢量等于旋转工频稳态相量,但是空间矢量与工频稳态相量具有显著的区别。

(1) 工频稳态相量没有实际的物理意义,仅仅是余弦量的数学表达;而空间矢量是三相余弦量的合成,其在三相坐标系的投影等于三相余弦量。

(2) 工频稳态相量是以频率为自变量的函数,因此相量法为频域分析法;空间矢量是

时间的函数，利用空间矢量的分析仍然是时域分析。

(3) 工频稳态相量仅能表示某一时刻或长时间稳定的余弦量，因此只能用于分析稳态运行的网络；空间矢量是随时间变化的量，因而可用于网络暂态过程的分析。

(4) 相量分析法一次只能针对一种频率成分的余弦量，空间矢量的合成满足严格的数学约束，不同频率成分的空间矢量可以联合分析。

1.2.2 空间矢量与序分量

电力系统中发电机、变压器等元件都是三相对称元件，充分换位的输电线一般也可视为三相对称，因而对于电力系统的三相对称故障通常可以方便地使用单相电路进行分析和求解。在系统发生不对称故障或不对称操作时，三相系统对称性被破坏，三相电流、电压的大小不再相等，相序也可能发生变化，各相参数之间具有强耦合性，直接求解三相不对称电路将十分复杂，因而常采用对称分量法对电力系统不对称故障进行分析。

对称分量法规定^[2]，对于三相不对称的工频稳态相量 $\dot{F}_{a,\text{fu}}$ 、 $\dot{F}_{b,\text{fu}}$ 、 $\dot{F}_{c,\text{fu}}$ ，可分解为三组对称的工频相量：第一组 $\dot{F}_{a(1),\text{fu}}$ 、 $\dot{F}_{b(1),\text{fu}}$ 、 $\dot{F}_{c(1),\text{fu}}$ 为正序分量，三个分量幅值相等，相位为正相序；第二组 $\dot{F}_{a(2),\text{fu}}$ 、 $\dot{F}_{b(2),\text{fu}}$ 、 $\dot{F}_{c(2),\text{fu}}$ 幅值相等，相位与正序分量相反，称为负序分量；第三组 $\dot{F}_{a(0),\text{fu}}$ 、 $\dot{F}_{b(0),\text{fu}}$ 、 $\dot{F}_{c(0),\text{fu}}$ 幅值和相位均相同，称为零序分量。其中，下标(1)、(2)、(0)表示正序、负序和零序分量。

三相不对称工频相量与三组对称工频相量之间满足叠加关系，三相工频电气量的瞬时值同样可以用正序、负序和零序分量的瞬时值表示为

$$\begin{cases} f_{a,\text{fu}}(t) = f_{a(1),\text{fu}}(t) + f_{a(2),\text{fu}}(t) + f_{a(0),\text{fu}}(t) \\ f_{b,\text{fu}}(t) = f_{b(1),\text{fu}}(t) + f_{b(2),\text{fu}}(t) + f_{b(0),\text{fu}}(t) \\ f_{c,\text{fu}}(t) = f_{c(1),\text{fu}}(t) + f_{c(2),\text{fu}}(t) + f_{c(0),\text{fu}}(t) \end{cases} \quad (1.17)$$

式中， $f_{a(1),\text{fu}}(t)$ 、 $f_{b(1),\text{fu}}(t)$ 、 $f_{c(1),\text{fu}}(t)$ 分别为三相工频正序分量的瞬时值； $f_{a(2),\text{fu}}(t)$ 、 $f_{b(2),\text{fu}}(t)$ 、 $f_{c(2),\text{fu}}(t)$ 分别为三相工频负序分量的瞬时值； $f_{a(0),\text{fu}}(t)$ 、 $f_{b(0),\text{fu}}(t)$ 、 $f_{c(0),\text{fu}}(t)$ 分别为三相工频零序分量的瞬时值。

三相工频正序分量值幅值相等，相位为正相序，所合成的空间矢量与式(1.15)一致：

$$\mathbf{f}_{abc(1),\text{fu}}(t) = \frac{2}{3} \left[f_{a(1),\text{fu}}(t) + f_{b(1),\text{fu}}(t) e^{j\frac{2\pi}{3}} + f_{c(1),\text{fu}}(t) e^{-j\frac{2\pi}{3}} \right] = F_{m(1),\text{fu}} e^{j(\omega t + \varphi_{(1),\text{fu}})} \quad (1.18)$$

式中， $F_{m(1),\text{fu}}$ 为正序分量的幅值； $\varphi_{(1),\text{fu}}$ 为 a 相正序分量的初相角。

三相负序分量的瞬时值幅值相等，相位为反相序，可以写为

$$\begin{cases} f_{a(2),\text{fu}}(t) = F_{m(2),\text{fu}} \cos(\omega_s t + \varphi_{(2),\text{fu}}) \\ f_{b(2),\text{fu}}(t) = F_{m(2),\text{fu}} \cos\left(\omega_s t + \varphi_{(2),\text{fu}} + \frac{2\pi}{3}\right) \\ f_{c(2),\text{fu}}(t) = F_{m(2),\text{fu}} \cos\left(\omega_s t + \varphi_{(2),\text{fu}} - \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (1.19)$$

式中, $F_{m(2),\text{fu}}$ 为负序分量的幅值; $\varphi_{(2),\text{fu}}$ 为 a 相负序分量的初相角。

将上式代入式(1.4), 利用欧拉公式可以得到三相工频负序分量合成的空间矢量为

$$\begin{aligned} f_{abc(2),\text{fu}}(t) &= \frac{2F_{m(2),\text{fu}}}{3} \left[\frac{e^{j(\omega_s t + \varphi_{(2),\text{fu}})} + e^{-j(\omega_s t + \varphi_{(2),\text{fu}})}}{2} \right] + \frac{2F_{m(2),\text{fu}} e^{j\frac{2\pi}{3}}}{3} \left[\frac{e^{j(\omega_s t + \varphi_{(2),\text{fu}} + \frac{2\pi}{3})} + e^{-j(\omega_s t + \varphi_{(2),\text{fu}} + \frac{2\pi}{3})}}{2} \right] \\ &\quad + \frac{2F_{m(2),\text{fu}} e^{-j\frac{2\pi}{3}}}{3} \left[\frac{e^{j(\omega_s t + \varphi_{(2),\text{fu}} - \frac{2\pi}{3})} + e^{-j(\omega_s t + \varphi_{(2),\text{fu}} - \frac{2\pi}{3})}}{2} \right] \\ &= \frac{F_{m(2),\text{fu}}}{3} \left[3e^{-j(\omega_s t + \varphi_{(2),\text{fu}})} + \left(e^{j(\omega_s t + \varphi_{(2),\text{fu}})} + e^{j(\omega_s t + \varphi_{(2),\text{fu}} - \frac{2\pi}{3})} + e^{j(\omega_s t + \varphi_{(2),\text{fu}} + \frac{2\pi}{3})} \right) \right] \\ &= F_{m(2),\text{fu}} e^{-j(\omega_s t + \varphi_{(2),\text{fu}})} \end{aligned} \quad (1.20)$$

三相零序分量 $f_{a(0),\text{fu}}$ 、 $f_{b(0),\text{fu}}$ 、 $f_{c(0),\text{fu}}$ 幅值相等, 相位相同, 可以写为

$$\begin{cases} f_{a(0),\text{fu}}(t) = F_{m(0),\text{fu}} \cos(\omega_s t + \varphi_{(0),\text{fu}}) \\ f_{b(0),\text{fu}}(t) = F_{m(0),\text{fu}} \cos(\omega_s t + \varphi_{(0),\text{fu}}) \\ f_{c(0),\text{fu}}(t) = F_{m(0),\text{fu}} \cos(\omega_s t + \varphi_{(0),\text{fu}}) \end{cases} \quad (1.21)$$

式中, $F_{m(0),\text{fu}}(t)$ 为零序分量的幅值; $\varphi_{(0),\text{fu}}$ 为 a 相零序分量的初相角。

同理, 可以得到三相工频零序分量的空间合成矢量为

$$\begin{aligned} f_{abc(0),\text{fu}} &= \frac{2F_{m(0),\text{fu}}}{3} \left[\frac{e^{j(\omega_s t + \varphi_{(0),\text{fu}})} + e^{-j(\omega_s t + \varphi_{(0),\text{fu}})}}{2} + e^{j\frac{2\pi}{3}} \left(\frac{e^{j(\omega_s t + \varphi_{(0),\text{fu}})} + e^{-j(\omega_s t + \varphi_{(0),\text{fu}})}}{2} \right) \right. \\ &\quad \left. + e^{-j\frac{2\pi}{3}} \left(\frac{e^{j(\omega_s t + \varphi_{(0),\text{fu}})} + e^{-j(\omega_s t + \varphi_{(0),\text{fu}})}}{2} \right) \right] \\ &= F_{m(0),\text{fu}} \left[e^{j(\omega_s t + \varphi_{(0),\text{fu}})} + e^{-j(\omega_s t + \varphi_{(0),\text{fu}})} \right] \left(1 + e^{j\frac{2\pi}{3}} + e^{-j\frac{2\pi}{3}} \right) = 0 \end{aligned} \quad (1.22)$$

三相不对称电气量 $f_{a,\text{fu}}(t)$ 、 $f_{b,\text{fu}}(t)$ 、 $f_{c,\text{fu}}(t)$ 合成的空间矢量应等于正序、负序和零序分量合成空间矢量之和, 所以可得

$$f_{abc,\text{fu}}(t) = f_{abc(1),\text{fu}}(t) + f_{abc(2),\text{fu}}(t) = \dot{F}_{a(1),\text{fu}} e^{j\omega_s t} + \dot{F}_{a(2),\text{fu}} e^{-j\omega_s t} \quad (1.23)$$

矢量 $f_{abc(1),\text{fu}}(t)$ 和 $f_{abc(2),\text{fu}}(t)$ 主要由 a 相正、负序相量决定, 因此分别称为三相静止坐

标系下的稳态工频正序矢量和负序矢量。

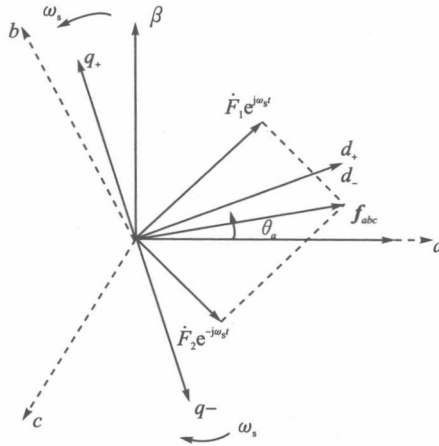


图 1.5 正、反向同步旋转坐标系下正负序矢量

三相静止坐标系下的正序矢量以同步速正方向旋转，负序矢量以同步速反方向旋转。正序矢量相对于正方向旋转的同步旋转坐标系保持静止，负序矢量相对于反方向旋转的坐标系保持静止。对于一个三相对称元件，如果流过三相正序电流，则元件上的三相压降也是正序的，即各序分量是相互独立的，因此正序矢量和负序矢量之间也相互独立，所以可以将三相不对称电气量合成的空间矢量分解至正、反向旋转的两个同步旋转坐标系中对应的正序矢量和负序分量形式，见图 1.5。假设正、反向同步坐标系 d 轴超前于 a 相轴的角度均为 θ_a ，正、反向同步旋转坐标系下的正序矢量和负序分量分别为

$$f_{dq+,fu}(t) = \dot{F}_{(1)} e^{-j\theta_a}, \quad f_{dq-,fu} = \dot{F}_{(2)} e^{-j\theta_a} \quad (1.24)$$

式中，下标+和-分别表示正向旋转坐标系的正序矢量和负序旋转坐标系下的负序矢量。

三相静止坐标系下的正、负序矢量可以用于暂态量和多种频率分量的联合分析，但是较为复杂。正、负序矢量分别相对于正、反向旋转坐标系保持静止，因此利用正、反向旋转坐标系下的正、负序矢量来表示三相不对称量，能够极大地简化分析。

1.2.3 非工频空间矢量

在三相对称的电力系统中，正常运行时的电气量一般为工频正弦量。电网发生故障时，由于感性元件磁链不能突变，通常会产生暂态直流的电气量，同时同步机转子直流电流产生静止磁场切割定子绕组会产生暂态工频电气量，而异步机转子暂态直流电流产生的转子反映将产生转速频率的电气量。

与三相工频稳态分量幅值总是相等不同，暂态电气量的初始值取决于电力系统发生扰动时刻三相电气量，而任意时刻三相工频电气量的瞬时值总是不同，即三相暂态直流、工频和转速频电气量的初始值一般不等，因此三相暂态直流、工频和转速频电气量可以写为

$$\begin{cases} f_{a,dc}(t) = F_{m_a,dc} e^{-\tau_{dc} t} \\ f_{b,dc}(t) = F_{m_b,dc} e^{-\tau_{dc} t} \\ f_{c,dc}(t) = F_{m_c,dc} e^{-\tau_{dc} t} \end{cases} \quad (1.25)$$

$$\begin{cases} f_{a,ft}(t) = F_{m_a,ft} e^{-\tau_{ft} t} \cos(\omega_s t + \varphi_{ft}) \\ f_{b,ft}(t) = F_{m_b,ft} e^{-\tau_{ft} t} \cos\left(\omega_s t + \varphi_{ft} - \frac{2\pi}{3}\right) \\ f_{c,ft}(t) = F_{m_c,ft} e^{-\tau_{ft} t} \cos\left(\omega_s t + \varphi_{ft} + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (1.26)$$

$$\begin{cases} f_{a,sp}(t) = F_{m_a,sp} e^{-\tau_{sp} t} \cos(\omega_r t + \varphi_{sp}) \\ f_{b,sp}(t) = F_{m_b,sp} e^{-\tau_{sp} t} \cos\left(\omega_r t + \varphi_{sp} - \frac{2\pi}{3}\right) \\ f_{c,sp}(t) = F_{m_c,sp} e^{-\tau_{sp} t} \cos\left(\omega_r t + \varphi_{sp} + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (1.27)$$

式中, 下标 **dc**、**ft**、**sp** 分别表示暂态直流、暂态工频和转速频的电气量; τ_{dc} 、 τ_{ft} 、 τ_{sp} 分别为对应频率量的衰减时间常数; ω_r 为产生转速频电气量的异步机转子旋转角速度。

根据空间矢量的定义, 可以分别利用三相暂态直流、工频和转速频电气量合成同步旋转坐标系下的空间矢量。若空间存在一矢量 $F_{abc,dc}$, 其初始幅值 $F_{m,dc} e^{-\tau_{dc} t}$ 和初始相角 φ_{dc} 满足以下关系:

$$F_{a,dc} = F_{m,dc} \cos \varphi_{dc}, \quad F_{b,dc} = F_{m,dc} \cos\left(\varphi_{dc} - \frac{2\pi}{3}\right), \quad F_{c,dc} = F_{m,dc} \cos\left(\varphi_{dc} + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (1.28)$$

所以, 可以得到同步旋转坐标系下暂态直流矢量(所指频率是以三相静止坐标系为基准, 下同)为

$$\begin{aligned} F_{dq,dc} &= \left[\cos \varphi_{dc} + \cos\left(\varphi_{dc} - \frac{2\pi}{3}\right) e_b + \cos\left(\varphi_{dc} + \frac{2\pi}{3}\right) e_c \right] F_{m,dc} e^{-\tau_{dc} t} e^{-j(\omega_s t + \theta_a)} \\ &= F_{m,dc} e^{j\varphi_{dc}} e^{-\tau_{dc} t} e^{-j\omega_s t} e^{-j\theta_a} = F_{abc,dc} e^{-j\omega_s t} e^{-j\theta_a} \end{aligned} \quad (1.29)$$

由式(1.29)可见, 暂态直流矢量在三相静止坐标系下保持静止, 相对于同步旋转坐标系反方向同步速旋转。与工频稳态矢量不同, 由于三相初始值不相等, 所以暂态直流矢量的初始幅值与三相瞬时值的初始值均不等。此外, 由于三相暂态直流的瞬时值无相位关系, 因此合成矢量相对于三相静止坐标系或同步旋转坐标系的角度完全由三相瞬时值的初始值决定。

同样地, 将三相暂态工频电气量合成同步旋转坐标系下的空间矢量可得

$$\begin{aligned} F_{dq,ft} &= F_{abc,ft} e^{-j(\omega_s t + \theta_a)} = F_{m,ft} e^{-\tau_{ft} t} e^{j(\omega_s t + \varphi_{ft})} e^{-j(\omega_s t + \theta_a)} \\ &= F_{m,ft} e^{-\tau_{ft} t} e^{-j(\omega_s t + \theta_a)} \left[\cos(\omega_s t + \varphi_{ft}) + \cos\left(\omega_s t + \varphi_{ft} - \frac{2\pi}{3}\right) e_b + \cos\left(\omega_s t + \varphi_{ft} + \frac{2\pi}{3}\right) e_c \right] \end{aligned} \quad (1.30)$$

式中, 初始幅值 $F_{m,ft}$ 和 a 相相角 φ_{ft} 满足: