

三相异步发电独立电力系统不对称稳态运行分析

张 阳¹, 吴新振¹, 黄丛慧²

(1. 青岛大学 电气工程系, 山东 青岛 266071;

2. 中南市政设计研究院青岛分院, 山东 青岛 266061)

摘要: 建立了三角形接法鼠笼式异步发电机三相负载不对称时独立系统的数学模型, 对该独立系统中各电量之间的关系进行分析, 计算发电机三相输出电压及绕组电流大小。基于对称分量法, 推导出发电机侧正序和负序等效电路, 并求出三角形连接的负载侧序电压与序电流之间的关系, 进而得出满足发电机稳态运行要求的目标函数, 省去了复杂的电路分析。针对稳态运行方程的非线性及复杂性, 采用优化算法求解出系统的频率和正序电抗, 并以此为基础计算系统的稳态电压值。计算值与实测值吻合度较高, 表明所提目标函数的正确性以及所采用优化算法的准确性和有效性。

关键词: 异步发电机; 独立系统; 不对称负载; 对称分量法; 稳态分析

中图分类号: TM 343

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.02.026

0 引言

与同步发电机相比, 鼠笼转子异步发电机既有励磁所需的集电环与外加励磁电源, 也不会出现永磁电机中复杂的转子结构与退磁现象, 其构造简单、运行可靠、成本低廉, 并能在严重过载及短路情况下实现短路自保护, 实际应用中能够避免一些灾难事故的发生。因此, 鼠笼转子异步发电机在飞机、舰船以及海上钻井平台等空间有限且可靠性要求较高的独立系统中使用广泛^[1-3], 并逐渐成为目前的研究热点。

由于三相异步发电机较多地应用于独立电力系统中, 在没有一定调频和调压辅助措施的情况下其输出电压和频率受负载的影响较明显^[4-8]。而独立系统中异步发电机的用电负荷往往为空调和照明等设备, 其种类有限且很难实现三相对称^[9-10]。即使负载能够三相对称分配, 三相电力线路及建压所需的励磁电容也很难做到参数一致, 最终也会造成发电机的三相不对称运行, 进而影响发电质量。由已有研究可知, 在原动机转速恒定的情况下, 系统输出频率受负载影响较小^[11-13], 因此本文讨论的重点放在三相不对称负载对系统输出电压的影响。

针对三相异步发电机的不对称运行, 已有国内外专家学者进行相关研究, 并提出不同的分析思路^[14-16]。文献[17]利用对称分量法将电机与其中两相负载的阻抗表达式求出, 与外接第三相负载构成回路阻抗, 并以此为目标函数求解电机稳态运行各参量; 文献[18]将电机侧与负载侧数学模型分别求

出, 并利用二端口法将二者联系成综合电路, 然后利用复合电路的拓扑结构对其中各参量进行求解。本文提出的方法不再借助回路阻抗或二端口概念, 而是基于对称分量法, 将负载侧的数学模型与电机侧等效电路中相关参量通过等价关系联系起来, 进而推导出电机的稳态运行方程, 省去了复杂的电路分析过程。由于该方程中包含非线性参数且表达式十分复杂, 因此本文将方程求解问题转化为二维函数的优化问题, 以系统频率标幺值和正序励磁电抗为变量, 最终求解出系统在三相不对称负载下稳态运行时的电量关系。三相异步发电机在实际应用中的连接方式较为灵活, 为验证所提出方法的准确性和有效性, 本文针对三角形接法的异步发电机进行稳态分析求解, 并将计算结果与实验数据相比较, 其分析方法亦适用于星形接法。

1 发电机侧数学模型

1.1 电机连接方式

图 1 为三角形接法异步发电机带三相不对称负载连接图。图中, U_{Ga} 、 U_{Gb} 、 U_{Gc} 为发电机侧三相绕组电压, 分别与负载侧电压 U_{La} 、 U_{Lb} 、 U_{Lc} 相等; I_{Ga} 、 I_{Gb} 、 I_{Gc} 为流过发电机三相绕组电流; I_{La} 、 I_{Lb} 、 I_{Lc} 为负载侧三相电流; C_{La} 、 C_{Lb} 、 C_{Lc} 为与三相负载并联的发电机励磁

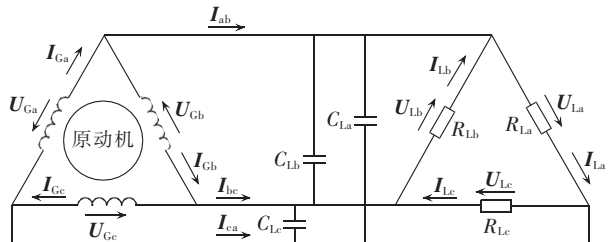


图 1 三角形接法异步发电机带三相不对称负载连接图
Fig.1 Connection diagram of delta-connected induction generator with three-phase asymmetric loads

收稿日期: 2015-10-10; 修回日期: 2016-11-04

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51377086, 51677092)
Project supported by the General Program of National Natural Science Foundation of China(51377086, 51677092)

电容; I_{ab} 、 I_{bc} 、 I_{ca} 为发电机与负载之间的三相线电流。当系统中三相负载电阻或三相励磁电容不相等时, 系统即处于不对称运行状态。

1.2 发电机侧等效电路

对于处于不对称运行状态的电机系统而言, 通常采用对称分量法进行稳态分析。对称分量法的应用场合是线性电路, 尽管异步发电机的磁化曲线具有非线性特性, 但考虑到系统中负序分量远小于正序分量, 在计算过程中仍可采用近似线性化处理, 其计算精度在误差允许范围内。

由于三角形接法电路中不含有零序电流分量, 因此该电机系统中利用对称分量法可将发电机侧电压与相电流分解为相应的序分量, 如式(1)和式(2)所示。电机侧正序和负序等效电路如图 2 所示。

$$\begin{bmatrix} U_{Ga} \\ U_{Gb} \\ U_{Gc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ a^2 & a \\ a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{(1)} \\ U_{(2)} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} I_{Ga} \\ I_{Gb} \\ I_{Gc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ a^2 & a \\ a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{(1)} \\ I_{(2)} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, $a = e^{j120^\circ}$; $U_{(1)}$ 和 $U_{(2)}$ 分别为三相绕组不对称电压的正序和负序分量; $I_{(1)}$ 和 $I_{(2)}$ 分别为三相绕组中流过不对称相电流的正序和负序分量。

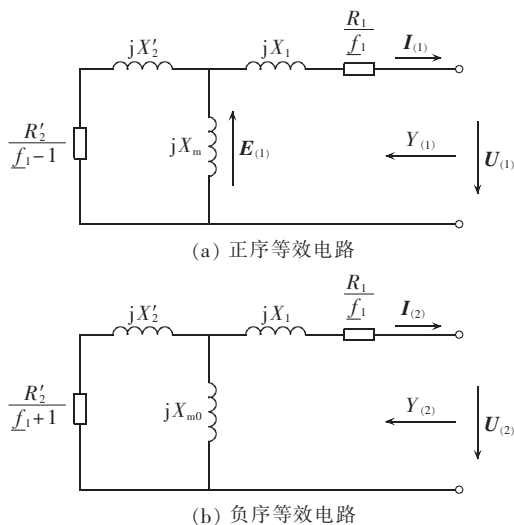


图 2 发电机侧正序和负序等效电路

Fig.2 Generator-side positive- and negative-sequence equivalent circuits

在图 2 所示发电机等效电路中, 各电量参数均已折算至基值频率下。其中, f_1 为定子电流频率标幺值; R_1/f_1 、 jX_1 和 jX_2' 分别为定子电阻、定子电抗和折算到定子侧的转子电抗; $R_2'/(\underline{f}_1 - 1)$ 、 $R_2'/(\underline{f}_1 + 1)$ 分别为正序和负序等效电路中的转子电阻; jX_m 为正序等效电路中的激磁电抗, 其大小反映了电机气隙磁场的饱和程度。由于该系统稳态运行时负序电流

较小, 因此电机的负序等效电路中可忽略磁场饱和的影响, 其激磁电抗采用折算到基值频率下的不饱和值 jX_{m0} 。为便于分析计算, 在误差允许范围内忽略铁芯损耗以及集肤效应引起的转子电阻和漏抗的变化。

根据等效电路中简单的串并联关系可得相应的正序和负序导纳分别如式(3)、(4)所示。

$$Y_{(1)} = \frac{\left[\frac{-j \frac{\underline{f}_1 - 1}{X_2' R_2'}}{\frac{\underline{f}_1 - 1}{R_2'} - j \frac{1}{X_2'}} - j \frac{1}{X_m} \right] \left(\frac{\underline{f}_1}{R_1} - j \frac{1}{X_1} \right)}{\frac{-j \frac{\underline{f}_1 - 1}{X_2' R_2'}}{\frac{\underline{f}_1 - 1}{R_2'} - j \frac{1}{X_2'}} + \frac{\underline{f}_1}{R_1} - j \left(\frac{1}{X_m} + \frac{1}{X_1} \right)} \quad (3)$$

$$Y_{(2)} = \frac{\left[\frac{-j \frac{\underline{f}_1 + 1}{X_2' R_2'}}{\frac{\underline{f}_1 + 1}{R_2'} - j \frac{1}{X_2'}} - j \frac{1}{X_{m0}} \right] \left(\frac{\underline{f}_1}{R_1} - j \frac{1}{X_1} \right)}{\frac{-j \frac{\underline{f}_1 + 1}{X_2' R_2'}}{\frac{\underline{f}_1 + 1}{R_2'} - j \frac{1}{X_2'}} + \frac{\underline{f}_1}{R_1} - j \left(\frac{1}{X_{m0}} + \frac{1}{X_1} \right)} \quad (4)$$

因此, 发电机侧序电流与序电压之间的关系可表示为:

$$\begin{bmatrix} I_{(1)} \\ I_{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -Y_{(1)} & 0 \\ 0 & -Y_{(2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{(1)} \\ U_{(2)} \end{bmatrix} \quad (5)$$

2 负载侧数学模型

将 a 相负载电阻与并联在其两侧的励磁电容 C_{La} 视为 a 相等效导纳负载, 记为 Y_{La} , 即:

$$Y_{La} = j \frac{\underline{f}_1^2}{X_{Ca}} + \frac{\underline{f}_1}{R_{La}} \quad (6)$$

其中, X_{Ca} 为 C_{La} 折算至基值频率下的容抗值。b 相和 c 相等效导纳负载 Y_{Lb} 和 Y_{Lc} 也可仿照式(6)写出。

三角形接法三相异步发电机带负载之后, 线电流与发电机绕组中流过相电流的关系为:

$$\begin{bmatrix} I_{ab} \\ I_{bc} \\ I_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{Ga} \\ I_{Gb} \\ I_{Gc} \end{bmatrix} \quad (7)$$

将式(2)代入式(7)可得:

$$\begin{bmatrix} I_{ab} \\ I_{bc} \\ I_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - a^2 & 1 - a \\ a^2 - a & a - a^2 \\ a - 1 & a^2 - 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{(1)} \\ I_{(2)} \end{bmatrix} \quad (8)$$

由于三相线电流 I_{ab} 、 I_{bc} 、 I_{ca} 中只有 2 个独立变量, 因此只取 I_{ab} 、 I_{bc} 进行计算, 则线电流与序电流分量之间的关系可降阶为:

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{I}_{ab} \\ \boldsymbol{I}_{bc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-a^2 & 1-a \\ a^2-a & a-a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{I}_{(1)} \\ \boldsymbol{I}_{(2)} \end{bmatrix}$$

(9)

将式(9)进行数学变换,可由线电流表示出序电流:

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{I}_{(1)} \\ \boldsymbol{I}_{(2)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{a} \\ 1 & \frac{1+a}{a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{I}_{ab} \\ \boldsymbol{I}_{bc} \end{bmatrix}$$

(10)

利用等效负载导纳可写出线电流 $\boldsymbol{I}_{ab}$ 、 $\boldsymbol{I}_{bc}$ 与负载电压之间的关系表达式为:

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{I}_{ab} \\ \boldsymbol{I}_{bc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -Y_{La} & Y_{Lb} & 0 \\ 0 & -Y_{Lb} & Y_{Lc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{U}_{La} \\ \boldsymbol{U}_{Lb} \\ \boldsymbol{U}_{Lc} \end{bmatrix}$$

(11)

由于三相负载电压 $\boldsymbol{U}_{La}$ 、 $\boldsymbol{U}_{Lb}$ 、 $\boldsymbol{U}_{Lc}$ 与相应的三相绕组电压 $\boldsymbol{U}_{Ga}$ 、 $\boldsymbol{U}_{Gb}$ 、 $\boldsymbol{U}_{Gc}$ 相等,因此可将式(1)直接代入式(11)中得到线电流与序电压之间的关系为:

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{I}_{ab} \\ \boldsymbol{I}_{bc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -Y_{La}+a^2Y_{Lb} & -Y_{La}+aY_{Lb} \\ -a^2Y_{Lb}+aY_{Lc} & -aY_{Lb}+a^2Y_{Lc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{U}_{(1)} \\ \boldsymbol{U}_{(2)} \end{bmatrix}$$

(12)

联立式(10)和式(12)可得负载侧序电流与序电压之间的关系为:

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{I}_{(1)} \\ \boldsymbol{I}_{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{U}_{(1)} \\ \boldsymbol{U}_{(2)} \end{bmatrix}$$

(13)

$$Y_{11} = -\frac{1}{3}Y_{La} + \frac{a}{3}Y_{Lb} + \frac{a^2}{3}Y_{Lb} - \frac{1}{3}Y_{Lc}$$

$$Y_{12} = -\frac{1}{3}Y_{La} + \frac{a}{3}Y_{Lb} + \frac{1}{3}Y_{Lb} - \frac{a}{3}Y_{Lc}$$

$$Y_{21} = -\frac{1}{3}Y_{La} - \frac{a}{3}Y_{Lb} + \frac{a}{3}Y_{Lc} + \frac{1}{3}Y_{Lc}$$

$$Y_{22} = -\frac{1}{3}Y_{La} - \frac{1}{3}Y_{Lb} + \frac{a}{3}Y_{Lc} + \frac{a^2}{3}Y_{Lc}$$

3 稳态运行电量求解

3.1 目标函数的确定

对于同一个电机系统而言,对称分量之间的关系是唯一存在的,因此由负载侧和发电机侧分别推导得出的序电压与序电流之间的关系式理论上是等价的。据此,由式(5)和式(13)之间的关系推导可得负载导纳与电机正负序导纳之间满足如下关系式:

$$Y_{11}Y_{12} = (Y_{(1)}+Y_{11})(Y_{(2)}+Y_{22})$$

(14)

式(14)中包含有 2 个待求量,即发电机定子电流频率标么值 f_1 和正序激磁电抗 X_m ,同时复数方程式(14)可写为实部等价和虚部等价 2 个方程,因此 2 个待求量均可通过对方程组求解得到。考虑到式(14)实际上是一个二元高阶非线性方程组,对其进行直接求解工作量大且运算复杂,因此本文采用优化求解方式,将其变形可得异步发电机不对称稳态运行需要满足的目标函数,如式(15)所示。

$$f(f_1,X_m) = |Y_{11}Y_{12} - (Y_{(1)}+Y_{11})(Y_{(2)}+Y_{22})|$$

(15)

该目标函数的推导不需要将发电机侧与负载侧等效电路连接,省去了复杂模型的推导,极大地简化了稳态求解过程。

3.2 其余分量的计算

在通过优化算法求得 f_1 与 X_m 之后,可根据电机磁化曲线查得基值频率下对应正序激磁电抗的发电机感应电势 E_1 。在三者均已得出的情况下可代入正序等效电路中求得正序电压及电流分量。联立式(5)和式(13)可求得负序电压分量为:

$$\boldsymbol{U}_{(2)} = \frac{Y_{21}\boldsymbol{U}_{(1)}}{Y_{(1)}+Y_{11}}$$

(16)

在已知正、负序电压分量的情况下,三相负载电压即可求出,根据发电机负序等效电路可求出相应负序电流,进而求出电机绕组中电流与负载中电流。

4 计算结果与实验验证

作为样机的实验室电机额定数据如下:额定功率 2.2 kW,定子三角形接法,额定电压 220 V,额定电流 8.66 A,额定(基值)频率 50 Hz,作为发电机运行时转子转速恒定为 1500 r/min。电机参数具体数值为:定子电阻 $R_1=2.80\ \Omega$,定子电抗 $X_1=3.44\ \Omega$,转子电阻折算值 $R'_2=3.20\ \Omega$,转子电抗折算值 $X'_2=3.44\ \Omega$ 。磁化曲线经线性拟合后表达式为:

$$X_m = 207.6 - 0.5947E_1$$

(17)

4.1 励磁电容不对称时电机稳态运行

表 1 给出了不同励磁电容下发电机的空载电压及绕组中电流的实测值与计算值。表 2 给出发电机在不同励磁电容下带三相 200 Ω 对称负载时系统的负载电压和发电机绕组电流。

表 1 三相励磁电容不对称(20 μ F、30 μ F、40 μ F)时发电机的空载电压与绕组电流

Table 1 No-load voltages and winding currents of generator with three-phase asymmetric excitation capacitors (20 μ F, 30 μ F, 40 μ F)

空载电压	计算值/V	实测值/V	误差/%	绕组电流	计算值/A	实测值/A	误差/%
U_{La}	179.28	173.88	3.79	I_{Ga}	1.42	1.34	5.90
U_{Lb}	183.75	178.32	3.75	I_{Gb}	1.77	1.67	3.59
U_{Lc}	183.33	176.64	3.79	I_{Gc}	2.03	1.91	6.28

表 2 三相励磁电容不对称(30 μ F、40 μ F、50 μ F)时发电机的负载电压与绕组电流

Table 2 Load voltages and winding currents of generator with three-phase asymmetric excitation capacitors (30 μ F, 40 μ F, 50 μ F)

负载电压	计算值/V	实测值/V	误差/%	绕组电流	计算值/A	实测值/A	误差/%
U_{La}	208.31	207.27	0.50	I_{Ga}	2.56	2.47	3.64
U_{Lb}	213.44	212.87	0.27	I_{Gb}	2.73	2.65	3.02
U_{Lc}	212.57	210.35	1.06	I_{Gc}	3.21	3.12	2.88

由表 1 和表 2 可以看出,电机带不对称励磁电容运行时,三相端电压与三相绕组中电流均出现一定程度的不对称,且后者的不对称性比前者略为严重。

4.2 负载不对称时电机稳态运行

表 3 给出三相励磁电容 C_{La} 、 C_{Lb} 、 C_{Lc} 均为 $40\text{ }\mu\text{F}$,而三相负载 R_{La} 、 R_{Lb} 、 R_{Lc} 不相等时负载电压与绕组电流的计算值和实测值。

表 3 三相负载不对称(100Ω、200Ω、300Ω)时发电机的负载电压与绕组电流

Table 3 Load voltages and winding currents of generator with three-phase asymmetric loads (100Ω,200Ω,300Ω)

负载电压	计算值/V	实测值/V	误差/%	绕组电流	计算值/A	实测值/A	误差/%
U_{La}	204.91	201.22	1.81	I_{Ga}	3.09	2.97	4.04
U_{Lb}	204.35	200.79	1.77	I_{Gb}	2.39	2.45	2.45
U_{Lc}	209.77	205.91	1.87	I_{Gc}	3.04	2.93	3.75

表 3 的结果表明,负载电压及绕组电流的计算值与实测值较为一致,从而验证了带负载运行时本文所用分析计算方法的有效性 with 准确性。

5 结论

本文针对独立系统中三角形接法的三相异步发电机不对称运行问题,采用对称分量法分别对电机侧和负载侧的序电流与序电压之间关系进行分析,并利用序分量之间关系的唯一性确立稳态运行的高阶非线性方程。为便于电量的求解,对方程进行变换得到目标函数,利用优化算法进行编程计算。所得稳态计算结果与实验数据吻合度较高,验证了所提目标函数的正确性与所采用遗传算法的准确性。

本文中目标函数的获取不涉及复杂的电路推导过程,思路简洁清晰,便于编程计算。该稳态分析方法不仅适用于三角形接法三相不对称电路,也适用于星形接法及单相负载供电的场合,通用性较强。但电机求解过程中将负序激磁电抗设为常数,在深度饱和状态下计算误差较大,应考虑对其改进。

参考文献:

[1] 马伟明. 电力集成技术[J]. 电工技术学报,2005,20(1):16-20.
MA Weiming. Power system integration technique[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2005,20(1):16-20.

[2] SINGH G K. Self-excited induction generator research—a survey [J]. Electric Power Systems Research,2004,69(1):107-114.

[3] 赵俊博,张葛祥,黄彦全. 含新能源电力系统状态估计研究现状和展望[J]. 电力自动化设备,2014,34(5):7-20,34.
ZHAO Junbo,ZHANG Gexiang,HUANG Yanquan. Status and prospect of state estimation for power system containing renewable energy [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014,34(5):7-20,34.

[4] MURTHY S S,SINGH B,GUPTA S,et al. General steady state analysis of three-phase self-excited induction generator feeding three-phase unbalanced load/single-phase load for stand-alone

stations[J]. IET Generation,Transmission and Distribution,2003, 150(1):49-55.

[5] 陈思哲,章云,吴捷,等. 双馈风力发电系统的比例谐振直接电压控制[J]. 电力自动化设备,2012,32(2):104-113.
CHEN Sizhe,ZHANG Yun,WU Jie,et al. Proportional-resonant direct voltage control of DFIG wind power generation system[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(2):104-113.

[6] WANG Kai,ZHANG Li,JI Bingcheng,et al. The thermal analysis on the stackable supercapacitor[J]. Energy,2013,59:440-444.

[7] 仲慧,王秀和,张洪宝. 三绕组单相异步电动机的性能分析与实验研究[J]. 电机与控制学报,2009,13(4):501-506.
ZHONG Hui,WANG Xiuhe,ZHANG Hongbao. Performance analysis and experimental research of three-winding single-phase induction motor[J]. Electric Machines and Control,2009,13(4): 501-506.

[8] WANG Kai,QI Chen,LI Chen. A new controlling strategy for balanced discharge based on supercapacitor storage system[J]. ICIC Express Letters,2012,6(11):2763-2768.

[9] 马宏伟,李永东,许烈. 不对称电网电压下双馈风力发电机的控制方法[J]. 电力自动化设备,2013,33(7):12-18.
MA Hongwei,LI Yongdong,XU Lie. Control strategy of DFIG under unbalanced grid voltage condition [J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(7):12-18.

[10] 张超,夏立,吴正国,等. 区分发电机不对称运行和定子绕组匝间短路的故障检测[J]. 电力自动化设备,2011,31(4):41-46.
ZHANG Chao,XIA Li,WU Zhengguo,et al. Distinguishing stator winding inter-turn short-circuit from asymmetrical operation of synchronous generator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011,31(4):41-46.

[11] 李海涛,卢子广,杨达亮. 自励异步发电机带载稳态的解析计算 [J]. 中国科学:技术科学,2014,44(11):1202-1210.
LI Haitao,LU Ziguang,YANG Daliang. Analytic computation for steady states of loaded self-excited generators [J]. Scientia Sinica Technologica,2014,44(11):1202-1210.

[12] SARSING G,GURUMOORTHY B,SHIKARIPUR S M,et al. Efficient voltage regulation scheme for three-phase self-excited induction generator feeding single-phase load in remote locations [J]. IET Renewable Power Generation,2013,8(2):100-108.

[13] 吴新振,兰勇,张智晟,等. 三角形接法三相异步发电机单相稳态建压分析[J]. 电网技术,2009,33(7):55-58.
WU Xinzhen,LAN Yong,ZHANG Zhisheng,et al. Single-phase steady-state voltage buildup analysis of delta-connected three-phase induction generator [J]. Power System Technology,2009, 33(7):55-58.

[14] CHAUHAN Y K,YADAV V K,SINGH B. Optimum utilization of self-excited induction generator,electric power applications [J]. IET Electric Power Applications,2013,7(9):680-692.

[15] CHAUHAN Y K,JAIN S K,SINGH B. A prospective on voltage regulation of self-excited induction generators for industry applications,industry applications [J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2010,46(2):720-730.

[16] 李海涛,卢子广. 基于 Lyapunov 稳定性理论的自励异步发电机建压过程分析[J]. 电工技术学报,2014,29(9):167-173.
LI Haitao,LU Ziguang. Analysis of voltage build-up for self-excited induction generators based on Lyapunov stability theory [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2014,29 (9):167-173.

[17] CHAN T F,LAI L L. Steady-state analysis and performance of a stand-alone three-phase induction generator with asymme-

trically connected load impedances and excitation capacitances [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2001,16(4): 327-333.

[18] WANG Y J,HUANG Y S. Analysis of a stand-alone three-phase self-excited induction generator with unbalanced loads using a two-port network model [J]. IET Electric Power Applications,2009,3(5):445-452.

作者简介:

张 阳(1990—),男,山东泰安人,硕士研究生,研究方向



张 阳

为异步发电机运行分析(E-mail:zhangyang_09@126.com);

吴新振(1964—),男,江苏南通人,教授,博士研究生导师,博士,通信作者,研究方向为电机系统运行分析与控制(E-mail:wuxinzen81@163.com);

黄丛慧(1989—),女,山东烟台人,工程师,硕士,研究方向为市政电气规划与设计(E-mail:huangconghui2011@163.com)。

Steady-state analysis for isolated three-phase induction generator system with asymmetric loads

ZHANG Yang¹,WU Xinzhen¹,HUANG Conghui²

(1. Department of Electrical Engineering,Qingdao University,Qingdao 266071,China;
2. Qingdao Branch of Central South Municipal Design Institute,Qingdao 266061,China)

Abstract: A mathematical model is established for an isolated system of delta-connected squirrel-cage induction generator with three-phase asymmetric loads,the relationship among its electric variables is analyzed and its three-phase output voltages and winding currents are calculated. The generator-side positive- and negative-sequence equivalent circuits are derived based on the symmetrical component method,the relationship between the sequence voltage and sequence current of delta-connected load side is built and the objective function for satisfying the steady-state operation of generator is derived without complex circuitry analysis. Aiming at the nonlinearity and complexity of the steady-state operation equations,an optimization algorithm is applied to solve the frequency and positive-sequence reactance of system,based on which the steady-state voltage of system is calculated. The better conformity between calculative and measured data verifies the validity and accuracy of the proposed objective function and the applied optimization algorithm.

Key words: induction generators; isolated system; asymmetric loads; symmetrical component method; steady-state analysis