

具备不平衡运行控制直驱风机 对近区系统负序电流的影响

徐红灿¹, 滕予非², 王晓茹¹

(1. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031;

2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610072)

摘要: 针对具备不平衡运行控制的直驱永磁同步风电机组 (direct-driven permanent magnet synchronous generators, DDPMSG) 提出了一种负序电流注入下, 含直驱风机系统的稳态不对称计算方法。在正负序网中, 将直驱风机等效为受控电流源, 然后根据系统正负序网, 列出系统正负序电压电流方程, 与直驱风机正负序电流指令值计算方程联立求解, 得到系统各参数的序分量。从理论上分析了直驱风机对近区系统负序电流的影响, 研究结果表明, 相比同步电机, 直驱风机使系统其他支路输出的负序电流更大。在双机无穷大以及十三节点配电网的算例中, 通过理论计算值与仿真值的对比, 验证了所提计算方法和结论的正确性。

关键词: 直驱风机; 负序电流; 不平衡运行控制; 同步电机

Abstract: A steady-state asymmetric calculation method for power system with direct-driven permanent magnet synchronous generators (DDPMSG) after the injection of negative-sequence current is proposed. In the positive and negative sequence networks, DDPMSG with the control strategy under unbalanced condition could be equivalent to the controlled current source. Then voltage and current equations based on positive and negative sequence networks of power system are listed. The sequence components of parameters of power system could be gained by solving the simultaneous equations combining the voltage and current equations and the current commands equations of the control strategy. The influence of DDPMSG on the negative-sequence currents of the system near DDPMSG is analyzed theoretically. The results show that DDPMSG may increase negative-sequence currents of other branches comparing with the synchronous generator. Finally, two case studies based on two-machine system and 13-node distribution network are presented, and the comparative analyses between theoretical calculations and simulation results verify the correctness of the calculation method and conclusions.

Key words: direct-driven generator; negative-sequence current; control strategy for unbalanced condition; synchronous generator

中图分类号: TM614 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2017)04-0014-06

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2017.04.003

0 引言

在环境与能源问题日益加剧的背景下, 风力发电因其清洁可再生的特点得到快速发展。直驱永磁同步风电机组 (direct-driven permanent magnet synchronous generators, DDPMSG) 具有效率高、故障率低、运维成本低等优点, 近年来成为主流风电机型之一^[1]。

中国适合大规模开发风电的地区一般都远离负荷中心, 甚至远离主干电网, 使得风电机组所联的电网实质上是一个存在电压跌落、电压不平衡、谐波畸变等各种运行风险的“弱电网”^[2]。电网不平衡会

恶化直驱风机的运行性能, 造成风机馈入电网的功率发生2倍于电网频率的波动, 并导致直流侧电压发生振荡^[3-4]。因此需要改进风机控制策略, 提高其在电网不平衡下的运行性能。

针对电网不平衡下直驱风机的运行控制, 文献[4-7]等采用了一种基于双旋转坐标系的正负序电流控制, 根据不同的控制目标产生正负序电流指令值, 实现输出功率稳定控制、负序电流抑制等控制目标。

与传统同步发电机不同, 逆变型分布式电源 (inverter interfaced distributed generation, IIDG) 在故障时的输出特性, 主要取决于其采用的控制策略^[8]。逆变器内部跟踪电量主要有电压和电流两

种,在分析计算时,可以分别等效为受控电压源和受控电流源^[9]。

已有文献对电网不平衡下逆变型电源的分析计算展开了研究。文献[9]考虑故障中IIDG序电流控制和无功功率支撑,认为IIDGs短路电流与并网点电压、并网运行时间有关,建立了包含负序电流的IIDG短路序分量电流源模型,提出多IIDGs系统的短路电流迭代算法。文献[10]假设变流器控制和锁相环理想工作下,认为IIDG在不同故障下均只输出正序电流,而无负序或零序电流,进而给出了输出故障电流的表达式。文献[11]指出正序分量控制下逆变型分布式电源在不对称故障时不输出负序电流,提出了计及控制特性的IIDG压控电流源等值模型,并给出了求解含IIDG配电网节点电压方程的方法。文献[12]基于并网逆变器抑制输出有功功率波动的控制策略,给出了具备不对称故障控制策略的逆变型电源,在不对称故障下的稳态短路电流公式,并通过仿真对比验证。

然而,针对弱联系电网中常见的系统含有负序电流的轻度不平衡工况下,含直驱风机系统的不对称计算尚少见报道。基于此,提出了一种含直驱风机系统稳态不对称计算方法,在正负序网中将直驱风机等效为受控电流源,通过联立系统正负序电压电流方程及直驱风机不平衡控制中电流指令计算方程,求解系统参数各序分量。同时从理论上分析了直驱风机对近区系统负序电流的影响,通过理论计算与仿真对比,验证了计算方法与结论的正确性。

1 直驱风机不平衡运行控制原理

DDPMSG一般采用背靠背变流器并网,其中网侧变流器的典型原理如图1所示。变流器经LCL滤波器并网。

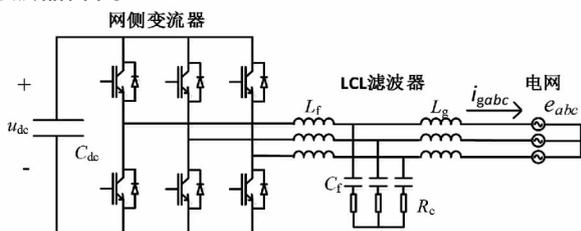


图1 LCL型网侧变流器原理图

图1中: L_f 、 L_g 、 C_f 分别为变流器侧电感、网侧电感及滤波电容; R_c 为串联阻尼电阻; C_{dc} 、 u_{dc} 分别为直流电容及其电压; e_{abc} 、 i_{gabc} 分别为三相电网电压和三相并网电流。

当电网出现不平衡时,变流器网侧复功率 S 为^[13]

$$S = P_g + jQ_g = (P_{g_0} + P_{g_{c2}} \cos 2\omega t + P_{g_{s2}} \sin 2\omega t) + j(Q_{g_0} + Q_{g_c} \cos 2\omega t + Q_{g_{s2}} \sin 2\omega t) \quad (1)$$

式中 P_g 、 Q_g 分别为有功、无功功率;下标0、s2、c2分别代表功率的平均分量和二倍频正、余弦波动分量; ω 为同步电角速度。由此可见,该工况下变流器网侧有功功率和无功功率都含有二次谐波分量,引起电网出现功率波动。

将式(1)进行派克变换,可以得到同步旋转 dq 坐标系下,功率各分量表达式为

$$\begin{bmatrix} P_{g_0} \\ P_{g_{c2}} \\ P_{g_{s2}} \\ Q_{g_0} \\ Q_{g_{c2}} \\ Q_{g_{s2}} \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} e_d^+ & e_q^+ & e_d^- & e_q^- \\ e_d^- & e_q^- & e_d^+ & e_q^+ \\ e_q^- & -e_d^- & -e_q^+ & e_d^+ \\ e_q^+ & -e_d^+ & e_q^- & -e_d^- \\ e_q^- & -e_d^- & e_q^+ & -e_d^+ \\ -e_d^- & -e_q^- & e_d^+ & e_q^+ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{gd}^+ \\ i_{gq}^+ \\ i_{gd}^- \\ i_{gq}^- \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 e 、 i_g 分别为电网电压、并网电流;上标+、-分别代表正序、负序分量;下标 d 、 q 分别代表同步旋转坐标系下的 d 、 q 分量。

由式(2)可知,网侧变流器输出功率的平均值及二倍频分量与并网电流正、负序下 dq 轴4个分量有关,因此,令 $P_{g_{s2}}^* = P_{g_{c2}}^* = 0$,并将其代入式(2)即可通过控制正、负序电流,消除有功功率二倍频波动;同时,控制平均无功功率为0,实现单位功率因数控制,可以得到并网电流的指令值为

$$\begin{bmatrix} i_{gd}^{+*} \\ i_{gq}^{+*} \\ i_{gd}^{-*} \\ i_{gq}^{-*} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_d^+ & e_q^+ & e_d^- & e_q^- \\ e_q^+ & -e_d^+ & e_q^- & -e_d^- \\ e_q^- & -e_d^- & e_q^+ & e_d^+ \\ e_d^- & e_q^- & e_d^+ & e_q^+ \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{2}{3} P_{g_0}^* \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{2P_{g_0}^*}{3D} \begin{bmatrix} e_d^+ \\ e_q^+ \\ -e_d^- \\ -e_q^- \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$D = [(e_q^+)^2 + (e_d^+)^2] - [(e_q^-)^2 + (e_d^-)^2]$$

式中 $P_{g_0}^*$ 为变流器平均有功功率指令,其与直流电容电压平均值有关。当直流电容电压采用PI控制器时,控制器输出为直流电容支路电流指令值,进而可得

$$P_{g,0}^* \left[\left(K_{pdc} + \frac{K_{idc}}{s} \right) (u_{dc}^* - u_{dc}) \right] u_{dc}^* \quad (4)$$

式中: K_{pdc} 、 K_{idc} 分别为控制器比例系数和积分增益; u_{dc}^* 为直流电容电压指令值。

进而采用最常用的基于双旋转同步坐标系的正负序电流控制^[13], 对式(3)中的电流指令值 i_{gd}^{+*} 、 i_{gq}^{+*} 、 i_{gd}^{-*} 、 i_{gq}^{-*} 进行无静差跟踪控制, 实现不平衡控制目标。

2 负序电流注入下含直驱风机系统序网分析

2.1 具备不平衡运行控制的直驱风机序网模型

逆变器内部跟踪变量主要有电压和电流两种, 根据其不同, 将逆变器分为电压控制型和电流控制型。在分析计算中, 可以分别等效为受控电压源和受控电流源。这里采用电流控制, 因而可以将直驱风机等效为受控电流源。

直驱风机经箱式变压器并网, 变压器的低压侧通常采用星形不接地或者三角形接线方式, 不存在零序通路, 因此在序网分析中, 不考虑零序网络。

由于变流器调节时间很短, 在分析直驱风机稳态输出时, 可以忽略电流控制内环, 认为实际电流等于电流指令值, 则有

$$[i_{gd}^{+*} \ i_{gq}^{+*} \ i_{gd}^{-*} \ i_{gq}^{-*}] = [i_{gd}^{+*} \ i_{gq}^{+*} \ i_{gd}^{-*} \ i_{gq}^{-*}] \quad (5)$$

进而可得

$$\begin{aligned} |\dot{I}_{DPC1}| &= |\dot{I}_{gdq}^{+*}| = |i_{gd}^{+*} + j i_{gq}^{+*}| = |i_{gd}^{+*} + j i_{gq}^{+*}| \\ |\dot{I}_{DPC2}| &= |\dot{I}_{gdq}^{-*}| = |i_{gd}^{-*} + j i_{gq}^{-*}| = |i_{gd}^{-*} + j i_{gq}^{-*}| \end{aligned} \quad (6)$$

式中, \dot{I}_{DPC1} 、 \dot{I}_{DPC2} 分别为直驱风机出口电流的正、负序分量。结合式(3)与式(6), 可以将直驱风机在正负序网中分别等效为受控电流源, 其输出主要受风机功率与正负序电压控制。

2.2 负序电流注入序网模型

由于风电富集地区常远离电网负荷中心, 因此

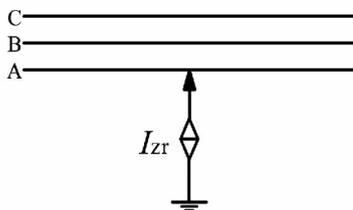


图2 负序电流注入方法

风电场所联为弱联系电网, 存在三相不平衡、电压跌落等运行风险。电网不平衡会使系统中产生负序电流, 下面通过往系统注入负序电流的方式, 来模拟电网轻度不平衡的工况。具体方式如图2所示。

在注入点的A相注入电流 I_{zr} , 可得注入电流所在支路三相电流为

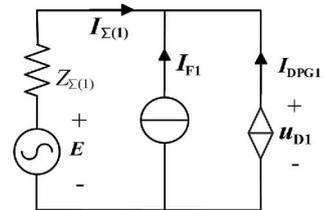
$$\dot{I}_A = \dot{I}_{zr}, \dot{I}_B = \dot{I}_C = 0 \quad (7)$$

进而可得, 三序电流为

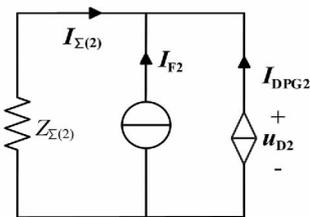
$$\dot{I}_{F1} = \dot{I}_{F2} = \dot{I}_{F0} = \frac{1}{3} \dot{I}_A = \frac{1}{3} \dot{I}_{zr} \quad (8)$$

2.3 含直驱风机系统不对称计算原理

基于上述分析, 在负序电流注入下, 对于任一常规系统, 接入具备不平衡运行控制的直驱风机, 采用对称分量法, 忽略零序网络, 可以得到其正、负序网络如图3所示。



(a) 系统正序网络



(b) 系统负序网络

图3 含直驱风机系统的正、负序网

图3中, E 为系统等效正序电压; $I_{\Sigma(1)}$ 、 $I_{\Sigma(2)}$ 分别为系统等效正、负序电流; $Z_{\Sigma(1)}$ 、 $Z_{\Sigma(2)}$ 分别为系统除直驱风机外的等效正、负序阻抗; u_{D1} 、 u_{D2} 分别为直驱风机出口电压的正、负序分量。

基于基尔霍夫电压、电流定律, 不难推算出

$$\begin{aligned} \dot{I}_{\Sigma(1)} + \dot{I}_{DPC1} + \dot{I}_{F1} &= 0 \\ \dot{E} - \dot{I}_{\Sigma(1)} Z_{\Sigma(1)} &= \dot{u}_{D1} \\ \dot{I}_{\Sigma(2)} + \dot{I}_{DPC2} + \dot{I}_{F2} &= 0 \\ -\dot{I}_{\Sigma(2)} Z_{\Sigma(2)} &= \dot{u}_{D2} \end{aligned} \quad (9)$$

可见, 负序电流注入下, 含直驱风机系统的不对称计算原理为: 首先求得系统的正、负序等效阻抗, 其次列出各序电压、电流方程式(9), 然后结合直驱风机

序网模型式(3)、式(6)以及负序电流注入序网模型式(8)联立求解,即可求解各序分量的稳态值。

2.4 与同步电机对比

在分析风电并网对系统的影响时,通常会将风电机组替换为同等容量的常规同步电机,通过两者的比较来进行分析。

相似的,在研究直驱风机对近区电力系统负序电流的影响时,将直驱风机替换为同等容量的同步电机。替换后,系统的负序网络如图4所示。

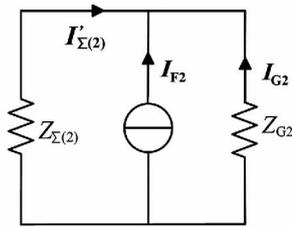


图4 替换为同步电机后系统负序网络

图4中: I_{G2} 为同步电机输出负序电流; $I_{\Sigma(2)}$ 为同步电机接入后系统等效负序电流; Z_{G2} 为同步电机负序阻抗。

由图4及式(9)可以推出

$$\begin{aligned} \dot{i}_{\Sigma(2)} &= -\dot{i}_{F2} - \dot{i}_{DPC2} \\ \dot{i}_{\Sigma(2)} &= -\frac{1}{1 + \frac{Z_{\Sigma(2)}}{Z_{G2}}} \dot{i}_{F2} \end{aligned} \quad (10)$$

由式(10)可知,在负序电流注入下,直驱风机的接入为系统增加了一个负序源;同时,相比于同步电机,直驱风机并不分担注入的负序电流。因此,直驱风机相比于同步电机,使近区电力系统的其他支路输出更大的负序电流。

3 算例分析

针对包含直驱风机与同步电机的双机无穷大系统和十三节点配电网系统,在负序电流注入的工况下,采用提出的不对称计算方法求解系统各序分量的稳态值。并将直驱风机置换为同步电机,通过比较研究直驱风机对系统负序电流的影响。将理论计算结果与PSCAD软件中电磁暂态仿真结果进行对比验证。

3.1 双机无穷大系统

风电机组对系统中传统电源的影响常受到研究

人员的关注。建立直驱风机与同步电机并列的双机无穷大系统见图5。

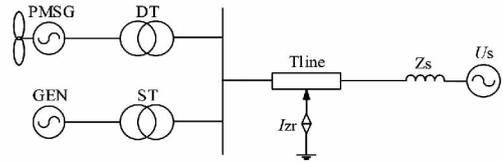


图5 直驱风机与同步电机并列系统

如图5所示,直驱风机与同步电机都经变压器和传输线接入无穷大系统,负序电流在传输线中点注入。图6给出了并列系统正、负序网络。

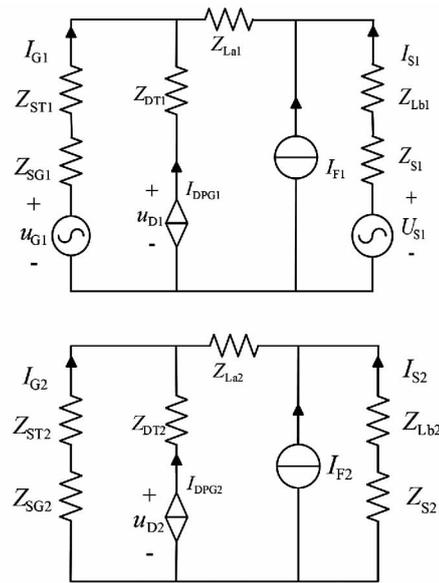


图6 双机无穷大系统正、负序网络

根据图6得到电压电流方程如下:

$$\begin{aligned} \dot{i}_{G1} + \dot{i}_{DPC1} + \dot{i}_{S1} + \dot{i}_{F1} &= 0 \\ \dot{U}_{S1} &= \dot{i}_{S1}(Z_{Lb1} + Z_{S1}) + (\dot{i}_{F1} + \dot{i}_{S1})Z_{La1} - \dot{i}_{DPC1}Z_{DT1} + \dot{u}_{D1} \\ \dot{u}_{D1} - \dot{i}_{DPC1}Z_{DT1} &= \dot{u}_{G1} - \dot{i}_{G1}(Z_{SG1} + Z_{ST1}) \\ \dot{i}_{G2} + \dot{i}_{DPC2} + \dot{i}_{S2} + \dot{i}_{F2} &= 0 \\ -\dot{i}_{G2}(Z_{SG2} + Z_{ST2}) &= \dot{u}_{D2} - \dot{i}_{DPC2}Z_{DT2} \\ -\dot{i}_{S2}(Z_{Lb2} + Z_{S2}) - (\dot{i}_{S2} + \dot{i}_{F2})Z_{La2} &= \dot{u}_{D2} - \dot{i}_{DPC2}Z_{DT2} \end{aligned} \quad (11)$$

式中: Z_s 为电源等效阻抗; U_{S1} 为电源正序电压; Z_{La} 、 Z_{Lb} 分别为注入点左、右边传输线阻抗; Z_{DT} 为风机出口箱变阻抗; Z_{ST} 为同步机出口箱变阻抗; 下标 1、2 分别表示参数正负序分量。

进而通过所提出的不对称计算方法计算系统各主要变量的序分量,在MATLAB中进行理论计算,同时在PSCAD进行仿真分析。仿真参数如表1所示。

表1 仿真系统主要参数

参数	取值	参数	取值
系统电压	11 kV	Z_{G1}	1.014 p. u.
风机有功均值	1.5 MW	Z_{G2}	0.297 p. u.
风机无功均值	0 Mvar	Z_S	0.8 mH
同步机有功均值	1.5 MW	Z_L	1.5 mH
同步机无功均值	0 Mvar	Z_{DT}, Z_{ST}	2%

设置 10 s 时,在传输线中点的 A 相注入电流 $1 \angle 120^\circ$ p. u.,系统主要变量的 MATLAB 计算值与 PSCAD 仿真值对比如表 2 所示。

表2 双机无穷大系统主要变量对比

变量		仿真值/kA	计算值/kA
系统电流	I_{s1}	0.140 70	0.145 80
	I_{s2}	0.042 59	0.042 70
风机输出电流	I_{DPC1}	0.079 12	0.079 36
	I_{DPC2}	0.000 415 5	0.000 392 9
同步机输出电流	I_{G1}	0.080 13	0.079 99
	I_{G2}	0.001 138	0.001 126

由表 2 可知,系统各主要变量的仿真值与计算值十分接近,验证了所提不对称计算方法的正确性。

将直驱风机替换为同等容量的同步电机 B,建立双同步电机无穷大系统,再次进行条件相同的仿真,结果如表 3 所示。对比表 2 与表 3 可知,与同步电机相比,直驱风机使并列同步电机输出负序电流更大,验证了理论分析的正确性。

表3 双同步电机无穷大系统主要变量对比

变量	仿真值/kA	计算值/kA
系统负序电流	0.041 55	0.041 72
同步机 B 负序电流	0.001 090	0.001 087
同步机 A 负序电流	0.001 093	0.001 087

3.2 十三节点配电网系统

为了进一步验证所提出的不对称计算方法,并分析直驱风机对近区系统负序电流的影响,建立典型十三节点配电网系统,将直驱风机与同步电机接入,系统结构见图 7。在节点 675 接入直驱风机,在节点 634 接入同步电机。系统负载节点主要参数见表 4。

其中,节点 646、684、611、652、680 的额定电压为 0.4 kV,需要经过变压器并网,变压器的容量都为 10 MVA。为了简化计算,在具体建模中将变压器的阻抗设成极小,因而在分析计算中可以忽略。同时,负载节点在建模中用电阻与电感并联的形式替代,电阻和

电感的参数可根据节点的额定电压和额定功率换算。

传输线参数 $Z_{L1} = Z_{L2} = 0.034 2 + j0.267 0 (\Omega/\text{km})$ 。

表4 十三节点系统负载节点主要参数

负载节点	额定电压/kV	有功功率/kW	无功功率/kvar
645	11	1 000	200
646	0.4	50	12
633	11	2 000	300
671	11	1 500	250
684	0.4	100	40
611	0.4	80	10
652	0.4	80	10
680	0.4	800	150
692	11	5 000	800

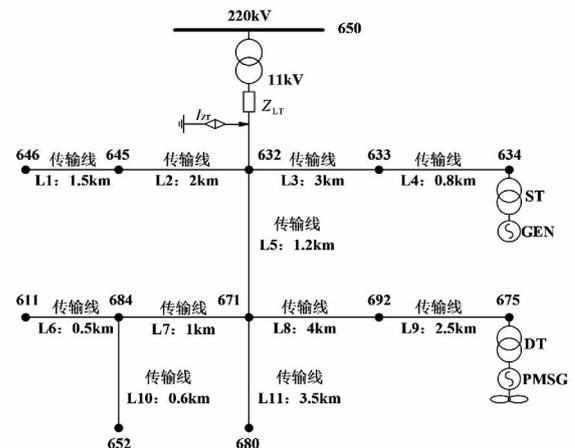


图7 十三节点配电网系统

表5 直驱风机接入十三节点系统主要变量对比

变量	仿真值/kA	计算值/kA	
系统电流	I_{s1}	1.699 8	1.706 5
	I_{s2}	1.321 6	1.322 5
直驱风机输出电流	I_{DPC1}	0.081 32	0.081 48
	I_{DPC2}	0.002 695	0.002 715
节点 634 同步机输出电流	I_{G1}	0.090 17	0.086 28
	I_{G2}	0.007 446	0.007 342

表 5 给出了十三节点系统主要变量理论计算值与仿真值的对比,可以看出仿真值与计算值很接近,证明了计算方法的正确性。

类似地,在同一节点,将直驱风机替换为相同容量的同步电机,系统主要变量的计算与仿真结果如表 6 所示。表 7 给出了两种接入情形下,各负载节点所在支路负序电流的仿真值。

表6 同步电机接入十三节点系统主要变量对比

变量		仿真值/kA	计算值/kA
系统电流	I_{S1}	1.692 9	1.712 3
	I_{S2}	1.315 3	1.315 5
替换的同步机 输出电流	I_{GB1}	0.084 95	0.084 83
	I_{GB2}	0.007 028	0.006 939
节点634同步机 输出电流	I_{GA1}	0.089 26	0.086 24
	I_{GA2}	0.007 410	0.007 303

表7 两种接入情形下负载节点所在支路负序电流对比

负载节点	同步电机接入/A	直驱风机接入/A	差值/%
645	1.752 68	1.761 50	-0.50
646	2.410 91	2.424 90	-0.58
633	3.341 51	3.357 80	-0.49
671	2.552 30	2.589 50	-1.46
684	4.972 13	5.049 50	-1.56
611	3.720 21	3.775 50	-1.49
652	3.720 18	3.775 80	-1.50
680	3.749 20	3.805 50	-1.50
692	8.074 55	8.286 00	-2.62

对比表5和表6可以看出,直驱风机接入比同步电机接入,使节点634所接同步电机输出了更大的负序电流。表7表明直驱风机接入时,系统各负载节点所在支路的负序电流更大,验证了理论分析的正确性。

4 结 论

针对具备不平衡运行控制的直驱风机,分析了负序电流注入下,含直驱风机系统的不对称计算原理,提出了一种计算系统参数各序分量稳态值的方法。从理论上分析了直驱风机对近区系统负序电流的影响,结果显示,相比于同步电机,直驱风机使系统其他支路的输出负序电流更大。在双机无穷大及十三节点配电网两个测试算例中,利用MATLAB的理论计算值与PSCAD的暂态仿真值进行对比,对比结果验证了所提方法及结论的正确性。

参考文献

[1] 王长路,王伟功,张立勇,等. 中国风电产业发展分析[J]. 重庆大学学报自然科学版, 2015, 38(1): 148-154.
[2] 贺益康,胡家兵. 双馈异步风力发电机并网运行中的

几个热点问题[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(27): 1-15.

[3] Wang Z, Nian H, Hu J. Enhanced Control Strategies of Permanent Magnet Synchronous Wind Power Generation System under Unbalanced Grid Voltage Conditions [C]// Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, IEEE, 2010: 1-4.
[4] 姚骏,陈西寅,廖勇,等. 电网电压不平衡时永磁直驱风电机组的控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(14): 99-106.
[5] 姚骏,陈西寅,廖勇,等. 抑制负序和谐波电流的永磁直驱风电系统并网控制策略[J]. 电网技术, 2011(7): 29-35.
[6] Ng C H, Ran L, Bumby J. Unbalanced-grid-fault Ride-through Control for a Wind Turbine Inverter [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2008, 44(3): 845-856.
[7] 程航,曹五顺,周明星. 不对称电网电压条件下直驱永磁风力发电机组并网逆变器的双电流闭环控制策略的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(7): 66-72.
[8] Baran M E, El-Markaby I. Fault Analysis on Distribution Feeders with Distributed Generators [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(4): 1757-1764.
[9] 周念成,叶玲,王强钢,等. 含负序电流注入的逆变型分布式电源电网不对称短路计算[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 41-49.
[10] 孔祥平,张哲,尹项根,等. 含逆变型分布式电源的电网故障电流特性与故障分析方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 65-74.
[11] 潘国清,曾德辉,王钢,等. 含PQ控制逆变型分布式电源的配电网故障分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(4): 555-561.
[12] 刘素梅,毕天姝,王晓阳,等. 具有不对称故障穿越能力逆变型新能源电源故障电流特性[J]. 电力系统自动化, 2016(3): 66-73.
[13] 张兴,张崇巍. PWM整流器及其控制[M]. 北京:机械工业出版社, 2012.

作者简介:

徐红灿(1992),硕士研究生,研究方向为电力系统稳定与控制、新能源并网等;

王晓茹(1962),教授、博士生导师,主要研究方向为电力系统稳定性分析与控制、含大规模可再生能源的电力系统的保护与控制等。

(收稿日期: 2017-04-06)