

降额定电压源逆变器调节风力驱动自励磁感应发电机的电压和频率

L.A.C 罗佩斯 R.G 阿尔麦达

电气和电子工程师协会高级会员

摘要:本文论述独立式定桨距风能变换系统中(WECS)自励磁鼠笼式感应发电机的电压和频率的调节。并联连接电压源逆变器(VSI)和可控卸载电路作调节之用。VSI的直流边接蓄电池组以便它能吸收和输出有功功率从而提高系统的效能和可用性。具有独立控制有功和无功功率的VSI的控制电路,使得蓄电池组充电状态保持在安全范围而最大限度地发挥VSI的电压调节能力。风力叶轮、自励磁发电机和VSI的额定能力的诸多特性都被充分考虑,以确定在给定风速状态下能够调节电压和频率的负载大小。推荐的该系统的可行性由模拟试验得到证明。

关键词:频率控制,感应发电机,负载控制,电压调节,风能发电

1 前言

独立式风能变换系统(WECSs)对于远离公共电网而用电量小的乡村是很适用的。鼠笼式感应电机,由于它的低成本、耐用、高功率比(W/kg),作为小中型发电系统很有吸引力,但是它产生电压的强度和频率取决于转子的速度、励磁量、负载的大小和功率因数。具有可调输出电压和频率的独立式WECS中鼠笼感应发电机的运行,需要一套异步网络(ac-dc-ac)功率电子变换器[1]、[2],或者一套矩阵变换器。前者的主要缺点是两套串联连接的ac-dc变换器的功率至少与发电机额定功率相当,从而需要二个功率单位的静止变换器。

参考文献中推荐用一套功率电子变换器的几个低费用的方案。在[3]中,一套带蓄电池组的串联连接的脉宽调制(PWM)VSI用于调节电压和频率,但是,当转子速度较低时这个方案出现低频谐波畸变。在[4]中,提出过自励磁感应发电机(SEIG)终端阻抗调节器的设想,并联连接可控硅整流器再加上PWM转换电阻器以控制吸收有功和无功率而不靠变换负载。这样,自励磁感应发电机的视在阻抗是恒定的,负载变化不会影响电压和频率。由于可控硅整流器

只能吸收有功和无功率,励磁电容器组比较大,该系统的效率就低。另一方面,该系统能采用并联连接的VSI,带电容器和在直流母线上连接转换电阻,如[5]所述。该系统就象它是在实际公用电网中一样为感应发电机提供标准的电压和频率而不需特别的控制方案。变换器自动地吸收或产生无功功率以调节端电压。但是,在[4]中,如终端阻抗控制器那样,变换器只能吸收有功功率。本文讨论降额定值即小于发电机的额定值的应用,也就是在直流边并联连接带蓄电池组的VSI以调节电压和发出电压的频率。用蓄电池组代替其他方案中所使用的电阻器可增加系统的效率,此外,当感应发电机发出的功率不足时,VSI也能提供有功功率给负载,从而提高了该系统的有效性。但是,要求VSI有更复杂的控制方案,以便保持蓄电池的充电水平在安全范围之内而不兼顾VSI的电压调节能力。该系统有一个卸载电路,当该交流系统中有功功率过剩而又不能被VSI和蓄电池吸收时,它帮助VSI卸载。本文也提出计算负载大小的方法,当远小于感应发电机定额的VSI用作主要的补偿装置时,以调节电压和频率而可以供给的这个负载。模拟结果证明:降额定VSI的调节范围的分析是正确的,该系统对负载和风速的变化响应也都是

正确的。

2 系统研究

图 1 是所研究的系统原理图。风力叶轮通过增速齿轮箱与感应发电机的转子连接。在发电机的定子边有励磁电容器组与卸载电路、VSI 和用户负载并联。VSI 用的控制方案示于图 2,它类似于[6]中所述,但 VSI 吸收或输出的有功功率与频率误差有关而不是直流母线的电压误差。在我们的情况下,当系统的频率高于标准值时,VSI 吸收储藏在蓄电池组中的有功功率。当蓄电池充足电时,或者当流经 VSI 的功率超过额定值时,启动控制卸载电路的相,它吸收 VSI 不能吸收的有功功率($i_{DL}^* = i_q^* - i_{q-VSI}^*$)。相反地,当系统的频率由于负载增加或风速减小而降低时,VSI 输出有功功率。

选择励磁电容器组的规格和卸载电路的方法叙述于第 5 章。设置交流电抗器,把 VSI 连接到感应发电机,使之与励磁电容器、低通滤波器一道防止由

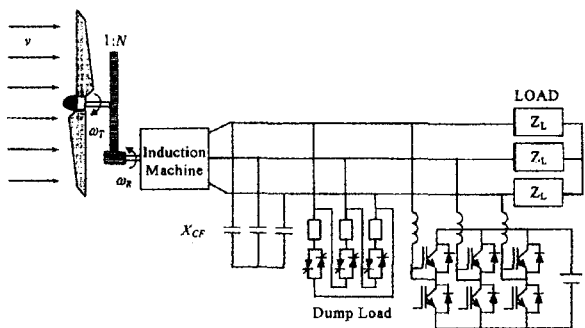


图 1 用一套静止功率变换器调节的 WECS

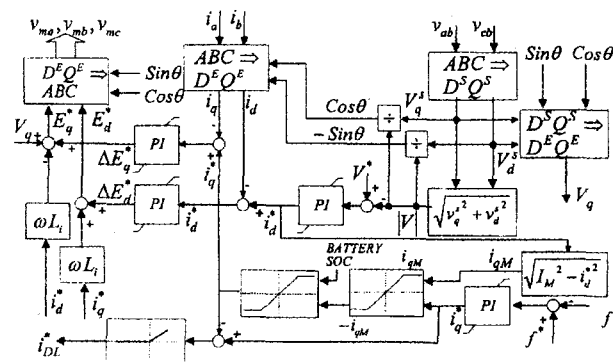


图 2 推荐的系统控制方框图

VSI 产生的谐波电流[5]。对于卸载电路的谐波电流,由分裂励磁电容器组和增加串联的电抗器可以实现调谐滤波。蓄电池组的规格应根据当地风速、负载分布和所要求的可靠性计算[7]。应该注意,在风速变化

的情况下,VSI 的规格确定能供给的负载大小,而蓄电池组(Wh)的规格和它的充电状况确定保持负载条件下的时间有多长。

3 模拟和分析程序

A 电系统

图 3 表示规整到基本频率的该系统(鼠笼感应发电机、励磁电容器组、卸载电路、VSI 和用户负载)的每单位、每相稳态等效电路。卸载电路由可变电阻器(R_{DL})和可变感抗(X_{DL})模拟,以表示被卸载电路吸收的有功和无功功率随晶闸管的导通角(α)而变的情况。VSI 包括交流边电感和蓄电池组由可变容抗(X_{VSI})与可变电阻器(R_{VSI})串联模拟。 X_{VSI} 和 R_{VSI} 的+和-符号分别表示 VSI 吸收和供给无功和有功功率的能力。VSI 的损耗被包括在 R_{VSI} 之中,负载(Z_L)表示可变量和功率因素。假设该系统中的电压和电流谐波由第 2 章中提到的滤波器而被减小到可接受的值。

本工作的目标之一是估算在给定风速范围内以比感应发电机额定功率稍小的 VSI 调节电压和频率所能供给的负载的大小。本文采用的方法是首先计算给定风速下应出现在感应发电机定子端的等效终

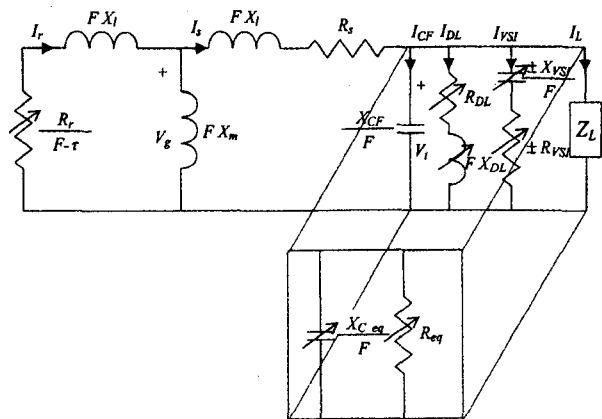


图 3 与电容器、卸载电路、VSI 和负载并联的感应发电机的单相等效电路

端阻抗(R_{eq} 和 X_{ceq}),从 1 个功率单位调节电压强度和频率。然后,减去由其他部分吸收或供给的有功和无功功率,可以确定负载阻抗的大小。另一方面,规定由该系统供给想要的负载范围,然后计算 VSI、励磁电容器和卸载电路所要求的视在功率。应该注意,感应电机外部所有阻抗都被归并到终端阻抗 R_{eq} —— X_{ceq} ,如图 3 所示。

感应发电机的转子和定子电阻值(R_r 和 R_s)被归

入定子边。假设鼠笼式机械,转子和定子的漏抗的数值是相等的($X_{lr}=X_{ls}=X_l$)。假设所有机械参数除了励磁阻抗之外都是不变的。

可写出定子电流(I_s)的闭环等式

$$Z_s I_s = 0 \quad (1)$$

$$\text{式中 } Z_s = Z_l + \frac{Z_c R_{eq}}{Z_c + R_{eq}} + \frac{Z_2 Z_m}{Z_2 + Z_m}$$

和

$$Z_l = R_s + jFX_l$$

$$Z_c = -jX_{C_{eq}}/F$$

$$Z_2 = \frac{R_r F}{F - \tau} + jFX_l$$

$$Z_m = jFX_m$$

由于稳定 $I_s \neq 0$, Z_s 的实部和虚部必须是 0。以 X_m 和 F 作为未知数重写方程式

$$f(X_m, F) = (C_1 X_m + C_2) F^3 + (C_3 X_m + C_4) F^2 + (C_5 X_m + C_6) F + C_7 X_m + C_8 \quad (2)$$

$$g(X_m, F) = (D_1 X_m + D_2) F^2 + (D_3 X_m + D_4) F + D_5 \quad (3)$$

在附录中确定的系数 C 和 D 包含机械参数加上终端阻抗($R_{eq}-X_{C_{eq}}$)和转子速度(τ)。求解式(2)和式(3),在基本频率状态下,需要数据探索方法和该机械的磁化特性知识。选择 X_m 和 F 的初始值为 X_m 和 τ ,只要得到 X_m 和 F ,由下列各式就可计算该机械的电压、电流和每相功率。

$$I_s = \frac{V_g (Z_c + R_{eq})}{Z_l (Z_c + R_{eq}) + Z_c R_{eq}} \quad (4)$$

$$I_l = \frac{I_s Z_c}{R_{eq} + Z_c} \quad (5)$$

$$V_i = I_l R_{eq} \quad (6)$$

$$I_r = \frac{I_s Z_m}{Z_l + Z_m} \quad (7)$$

$$P_{in} = \frac{I_r^2 R_r \tau}{F - \tau} \quad (8)$$

$$P_o = V_i I_l \quad (9)$$

B 机械系统

转子速度取决于增速齿轮箱的增益(N)和风力叶轮的速度,也随风速和 $C_p-\lambda$ 曲线上的工作点而变。风力叶轮通过该感应电机转换成电能的有效机械功率,当忽略齿轮箱的损耗时,以下式给出

$$P_{WT} = 0.5 \rho \pi R^2 C_p v^3 \quad (10)$$

式中

ρ ——空气密度(kg/m^3)

R ——风力叶轮的半径(m)

C_p ——风力叶轮的功率系数

v ——风速(m/s)

风力叶轮的功率系数(C_p)随尖端速比(λ)非线性地变化,也是该叶轮的属性。尖端速比定义为叶片尖端线速度($\omega_T R$)和风速之比, ω_T 是风力叶轮的转速。图4描述三叶风力叶轮的 $C_p-\lambda$ 曲线[8]。它表示在尖端速比 λ_m 处, C_p 达到最大值($C_{p,max}$)。也就是在给定风速下,风力叶轮此处产生有效的最大机械功率。事实上,稳态叶轮速度由风力叶轮功率平衡来确定。也就是给定风速和感应机械中所需要的输入机械功率以提供给定的负载,从 $C_p-\lambda$ 曲线中用 C_p 得到 λ 的稳态值,其结果是 $P_{WT} = P_m$ 。为了稳定地运行, λ 的值应大于 λ_m 。

4 理想的可变终端阻抗

本章的任务是确定终端阻抗的($R_{eq} X_{C_{eq}}$)的理想值,以使负载状态下,在风速 3~9m/s 之间,电压和频率能适应 1 个功率单位。值得指出的是这些数值不用于控制 VSI, 在第 5 章中会用它们来计算负载大小,用降额定值 VSI 或额定值 VSI 对所想要的负载作调

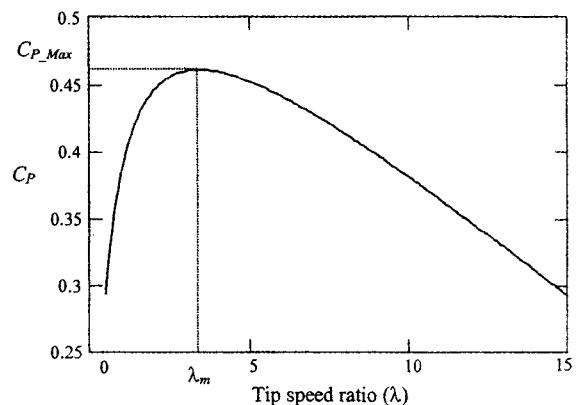


图4 三叶风力叶轮升阻比 30 的 $C_p-\lambda$ 曲线

节运行。三叶风力叶轮和用于本分析的感应机械的主要参数(R 和 $C_p-\lambda$ 曲线)列于附录中。假设增速齿轮箱无损耗,增益系数为 N ,曾选为 31,在风速 9m/s 和从风力轮转换最大功率的状态下,使感应发电机能提供额定电压额定频率下近似于额定叶轮的功率。

为了在额定频率下运行,风力叶轮必须接近恒速运行。对于额定风速(9m/s),风力叶轮以 $\lambda=\lambda_m$ 和 $C_p=C_{p,max}=0.461$ 的状态下运行。对于所研究的风力叶轮,在最小风速(3m/s)状态下,尖端速比 λ 必须增加到 3 倍和 $C_p=0.376$ 。因此,在此风速下,风力叶轮的效率减小到其最大值的 81.5%。此系数主要是随风

力叶轮的 $C_p-\lambda$ 曲线的形状而变, 在右边曲线越下降, 功率损耗越高。

从额定风速 9m/s 开始, 然后递减风速, 求得终端阻抗 ($R_{eq}X_{C_{eq}}$) 理想值的计算结果。在这个风速状态, 期望叶轮以最大效能 ($C_{p_{max}}$ 和 λ_m) 运行。忽略齿轮箱的损耗, 从式 (10) 求得感应发电机的输入功率, 然后求得叶轮速度和发电机轴的转速 ($\tau=N_{wr}$), 再次, 用第 3 章列出的等式和渐近搜索程序 [9] 初始估计终端阻抗 ($R_{eq}=R_{r_{actual}}$ 和 $X_{C_{eq}}=X_{m_0}$) 之值, 可以求得所需的 R_{eq} 和 $X_{C_{eq}}$ 值。首先改变 λ , 寻求 $F=1pu$, 然后改变 R_{eq} 和 $X_{C_{eq}}$, 试取 $U_i=1pu$ 和 $P_{wr}=P_{in_0}$ 。如果引起 F 变化, 再改变 λ 。在风速 9m/s 状态下求得 R_{eq} 和 $X_{C_{eq}}$ 的理想值之后, 再在低风速下, 用 R_{eq} 和 $X_{C_{eq}}$ 以前的值作为初始估值, 重复此程序。

图 5 表示给定的各种风速下, 感应发电机处于输出状态, 电压和频率都为 1PU 的终端阻抗的理想值。在额定风速 (9m/s) 状态下, 输出功率少于 1PU, 是因为用感应发电机的相值作为基本值, 以每相为基础作的计算。这就是每相基本功率是 6350VA, 而风力叶轮在风速 9m/s 状态下提供 15KW。容抗应是在比较狭窄的 2.17 和 2.79pu 之间变化。容抗随风速减小而增加, 这是由于发电机定子电压随有功输出功率的减小而降落, 而且需要较小的无功功率以保持输出电压在额定值状态 [10]。

5 用 VSI 调节电压和频率的负载范围

第 4 章中讨论的程序, 得出了等效励磁阻抗负

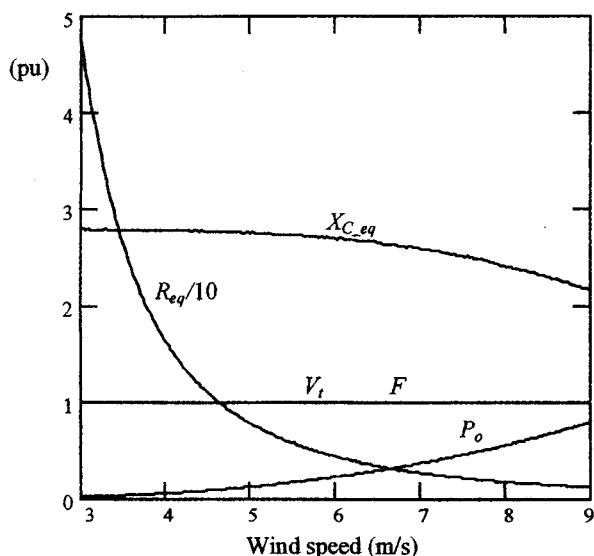


图 5 风速引起电压和频率调节, 理想的等效励磁阻抗负载随风速而变化

载的理想稳态值的计算结果, 以便为给定风速下调电压和频率, 从而为每个风速状态下有一个理想的定子电流 (I_s), 从发电机来的这个电流供给固定电容器组、卸载电路、VSI 和负载。

图 3 中相量符号表示的基本电流与下式有关

$$I_s = I_{CF} + I_{DL} + I_{VSI} + I_L \quad (11)$$

考虑: 在发电机各端子上的电压和效率以 1pu 调节, 固定电容器组中的电流 (I_{CF}) 是不变的。假设负载大小和功率因数是可变的, VSI 应能调节 I_s 到适当的值, 通过控制与该系统互换有功和无功率来实现电压和频率的调节。卸载电路仅是被启动以防止蓄电池组过充或轻负载状态下 VSI 过载。

在下面的稳态分析中, VSI 以远小于发电机的基本功率标定的视在功率 (S_{VSI}) 表示, 然后, 给出固定电容器组和以 $S_{VSI}pu (<1)$ 标定的 VSI, 可以计算调节电压和频率的负载大小。

分离式 (11) 中的实部和虚部

$$R_{e_0}(I_s) = R_e(I_{DL}) + R_e(I_{VSI}) + R_e(I_L) \quad (12a)$$

$$I_m(I_s) = |I_{CF}| + I_m(I_{DL}) + I_m(I_{VSI}) + I_m(I_L) \quad (12b)$$

式中 $I_m(I_s) > 0$, $I_m(I_{DL}) < 0$, $|I_{CF}| > 0.1m(I_{VSI})$

且 $I_m(I_L)$ 可以是小于 0 或是大于 0。

负载电流的实部和虚部是

$$R_e(I_L) = PF |I_L| \quad (13a)$$

$$I_m(I_L) = K \sqrt{1 - PF^2} |I_L| \quad (13b)$$

式中 PF 是负载功率因数, $K=-1$ 对于电感负载, 而 $K=1$ 对容性负载。为了满足功率条件, VSI 输入电流 (用 pu) 的实部和虚部应是

$$R_e(I_{VSI})^2 + I_m(I_{VSI})^2 \leq S_{VSI}^2 \quad (14)$$

以式 (13) 代入式 (12), 求得与 VSI 电流有关的诸项, 然后代入式 (14), 求解负载电流的值, 得

$$|I_L|^2 - 2[A \cdot PF + BK \sqrt{1 - PF^2}] |I_L| + A^2 + B^2 - S_{VSI}^2 \leq 0 \quad (15)$$

式中, $A = R_e(I_s) - R_e(I_{DL})$, $B = I_m(I_s) - |I_{CF}| - I_m(I_{DL})$

对于一个给定功率因数, 为计算被调节的负载大小, 需要规定 VSI 的视在功率, 选定固定电容器组的容抗和卸载电路的额定功率。本文采用的准则是: 当 V_{min} (3m/s) 和 V_{max} (9m/s) 带电阻负载状态下, 被 VSI 产生和吸收的无功功率是相同的。给出的容抗以下式表示

$$X_{CF} = 2 \frac{X_{C_{eq_{min}}} X_{C_{eq_{max}}}}{X_{C_{eq_{min}}} + X_{C_{eq_{max}}}} \quad (16)$$

采用在第 4 章中求得各值, 选择固定电容器

组的容抗为 2.443PU。按最坏的情况设计卸载电路；感应发电机供给最大功率而负载是零，由于蓄电池组充足电，VSI 不能吸收任何有功功率。因此

$$|I_{DL_rated}| = R_e(I_s)_{Max} = \frac{1}{R_{eq_min}} \text{ pu} \quad (17)$$

对于所考虑的系统，计算卸载电路的额定功率为 0.734pu。值得提出的是，随交流控制器导通角的增加，卸载电路开始吸收来自固定电容器和 VSI 的无功功率，因而达到无载状态下的电压调节，下式是必要的

$$|I_m(I_{DL})| < S_{VSI} + |I_{CF}| - I_m(I_s) \quad (18)$$

蓄电池全充，中等风速，交流控制器的导通角比较大，以使卸载电路吸收的有功功率与发电机提供的小量有功功率相等，从而交流控制器需要的无功功率增加。可以看出，交流控制器吸收的最大无功功率是 0.246pu，而发生在 $v=7.1\text{m/s}$ 时。对于无负载的状态，VSI 的视在功率必须至少是 0.23pu，以达到电压调节的目的。

图 6 表示不同功率因数和 0.5pu 标定的 VSI 可能调节的负载范围。图 6(a)中 PF=1 有三条曲线；上

部一条曲线表示该系统能够提供的最大负载电流。在此情况下，卸载电路断开；下部二条曲线表示负载必须吸取的最小电流，才能保护下述二种情况下调节频率和电压。一是没有卸载，另一个是以 0.15pu 卸载。在第一种情况下(虚线所示)，风速 $v=7.8\text{m/s}$ 以上，负载电流可能是 0。超过此点，负载电流很小，不能调节电压高低和频率，因为 VSI 不能吸收风力转换的全部功率。下部另一条曲线表示采用 0.15pu 卸载来进一步增大风速范围可作无载运作。图 6(b)表示当 PF=0.85，卸载 0.734PU 时可能的感性负载范围。这表示功率因数减小时，能多提供的最大视在功率也减小，因为 VSI 必须供应更多的无功功率。0.734PU 卸载的存在取消了关于最小负载电流的限制。图 6(c)表示 PF=0.7 采用感性负载时，靠 0.5pu-VSI 不能调节电压和频率。这个问题靠增加固定电容器的容量或增加 VSI 的视在功率来缓解。图 6(d)表示当增加 VSI 的视在功率到 0.6pu 时可能的负载范围。

6 模型试验结果

调节发电电压的高低和频率的 VSI 的有效性，用 PSIM 通过数字模拟已经证明是可行的。最近，由 POWERSIM 开发和本文作者精心设计的鼠笼感应发电机，允许用户选定该机的全部参数包括磁化曲线。以 $C_p-\lambda$ 曲线为基础和包括转动惯量的风力叶轮的样品已在工厂做出，假设无损耗有增速比的齿轮箱也做出了样品。机械系统的主要参数列于附录中。根据在第 5 章中提出的分析， Δ 连接的固定电容器组的容抗选为 0.443pu。VSI 的感抗是 2mH。 i_d 和 i_q 回路的 PI 控制器的放大系数是 4.34，时间用常数 0.022s。 $|V|$ 和 f 回路的放大系数分别是 0.5 和 2，时间常数

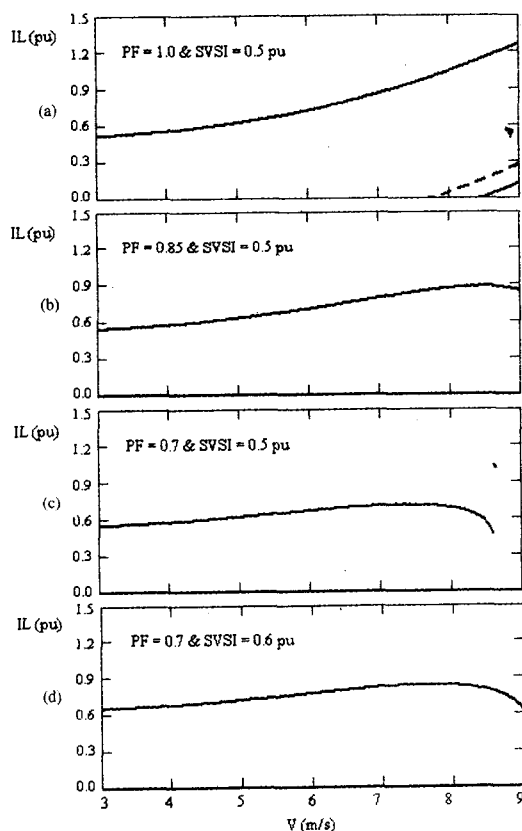


图 6 当风速变化时，负载功率因数和 VSI 的量值对于靠调节电压和频率所能提供的负载范围的影响

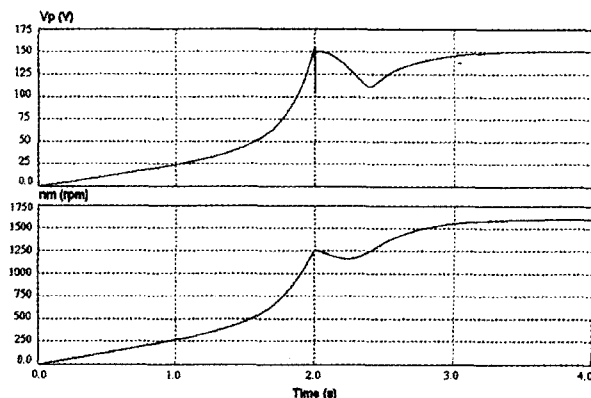


图 7 只带电容器组的 SEIG 的启动过程

分别是 0.1s 和 0.06s。这些试验都未采用卸载电路。

图 7 表示该系统启动过程中发电机转轴速度和电压强度。断开负载和 VSI, 风速是 8m/s。当电压是 150V, 轴转速是 1250rpm 状态下, 在 $t=2s$ 时接通 Y 形连接的 3.4Ω 负载 ($R_L=1.33pu$), 这些参数的稳态值分别是 151V 和 1602rpm。

图 8 表示 VSI 调节发电电压强度和频率的作用, VSI 能在 $t=4.2s$ 时增加发电电压强度和频率到它们的额定值。根据图 5, 发电机各端部要求的等效电阻和电容容抗应该分别是 $1.834pu$ 和 $2.42pu$ 才可达到风速 8m/s 状态下调节电压和频率的目的。由于实际电阻负载和固定励磁容抗的值小于这些值, $R_L=1.33pu$ 和 $X_c=2.433pu$, VSI 应供给大量的有功功率和少量的无功功率。图 8 中 i_d^* 和 i_q^* 的波形可以看出。注意: 在模拟原理图中, VSI 的电流的方向是从 VSI 到负载和发电机。

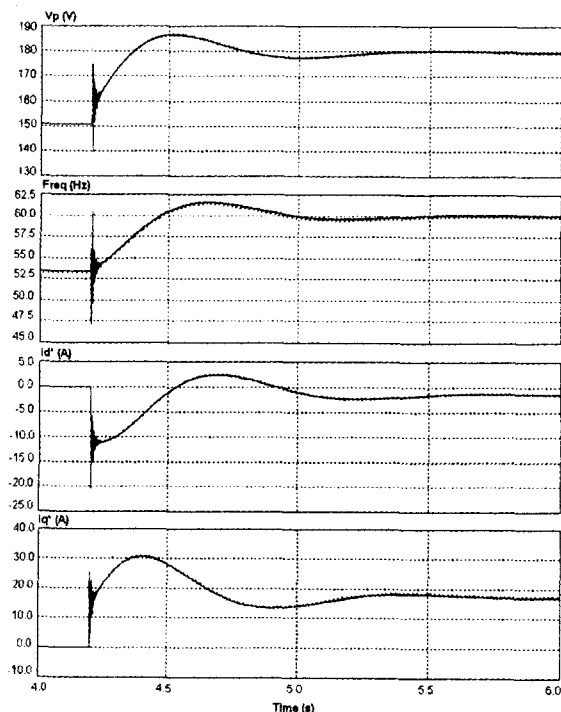


图 8 VSI 调节电压和频率时的震荡

图 9 表示该系统对负载变化的响应。电阻负载 16.9Ω 在 $t=6.2s$ 时接通, 在 $8.2s$ 时断开。经瞬变过程后, 电压和频变回到两者的额定值, 证明所推荐的系统有更好的调节特性。连接两个负载, 被它们消耗的有效功率是 17.16KW 或 0.9pu。风力叶轮提供约 10.5KW 的机械功率。在稳态, VSI 运行, $i_d^*=28.5A$, $i_d^*=-1.53A$, $V_q=V_p=179.6V$, $V_d=0$, 它供给 7678W 和

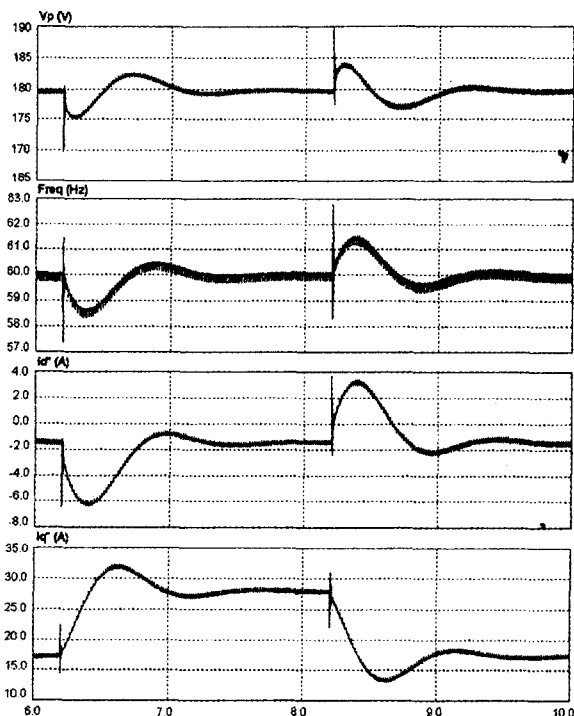


图 9 负载变化的系统时状态

412var。为调节之用, 要求从 VSI 来的总功率是 7689VA 或 0.4pu。曾经选择 0.9pu 电阻负载, 如图 6 (a) 所示, 当风速是 8m/s 时, 它接近所推荐的系统用降额定 (0.5pu) VSI 调节电压和频率能供给的负载的最大值, 因此, 在第 5 章中提出的分析得到证实。

该系统对风速变化的瞬态响应示于图 10。风速在 $t=8.2s$ 时降到 7m/s, 而在 12.2s 时升到 9m/s。在过渡过程结束后, 电压和频率回到它们的额定值, 这是由 VSI 供给的有功和无功功率变化的结果。值得指出的是, 对于风速 9m/s 时, 由 VSI 供给的有功功率很小 ($i_d^*=0.8A$)。实际负载 3.4Ω ($R_L=1.33pu$) 很接近调节电压和频率所需要的等效终端电阻值 ($R_{eq}=1.293pu$), 如图 5 所示。

7 结 论

本文提出了以自励磁鼠笼感应发电机为基础而不带机械叶轮控制的独立式恒速恒频 WECS 的分析方法。虽然恒速运行只在各额定状态下供给最大的叶轮功率转换, 当采用比较平坦的 $C_p-\lambda$ 特性曲线的风力叶轮时, 在其他各点运行的功率损失并不显著。本文说明: 在直流边带蓄能装置, 并联固定励磁电容组和卸载电路, 在负载各种风速状态下降额定 VSI 能够成功地用于调节频率和电压强度。本文也提出

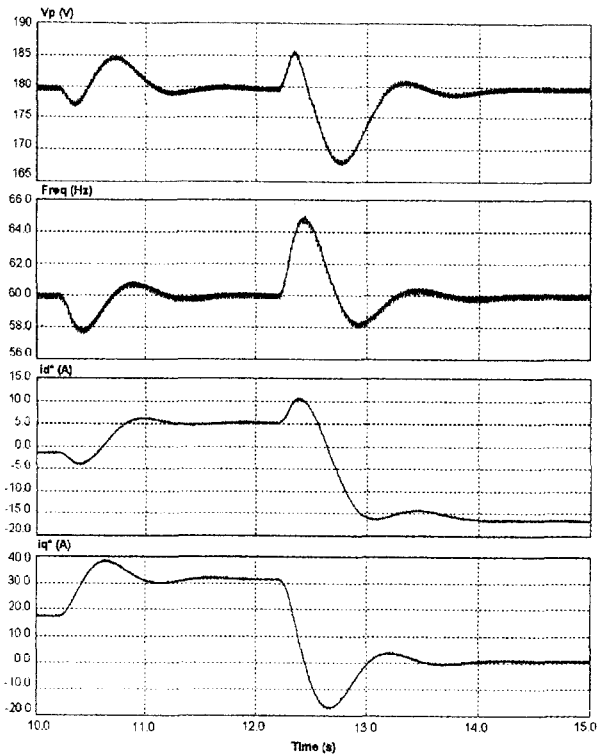


图 10 由于风速变化该系统的运行状态

了对于给定的各种风速状态下，由降额定 VSI 能够为负载调节电压和频率的计算负载的方法，还可容易地延伸为给定负载范围要求调节电压和频率的最小的 VSI 的额定值的计算方法。

本文提出了 VSI 的控制电路图，它独立控制系统的有功和无功功率以防止蓄电池过充和欠充，且仍然调节系统的电压，这是现在流行的 VSI 不能做到的。同时，它允许 VSI 使用它的大部分功率容量来调节系统的电压，当交流系统中有功功率过剩时，可控卸载电路限制频率增大。最后，提出了模拟试验的结果，证明理论分析是正确的，在负载变化和各种风速状态下，该系统的灵敏度也得到验证。

附 录

$f(X_m, F)$ 和 $g(X_m, F)$ 的系数

$$C_1 = -2X_1 R_{eq} \quad C_2 = -X_1^2 R_{eq} \quad C_3 = -C_1 \tau$$

$$C_4 = -C_2 \tau \quad C_5 = -(R_{eq} + R_s + R_r) X_{C, ep}$$

$$C_6 = (R_{eq} + R_s + R_r) X_{C, ep} X_1 + R_s R_{eq} R_r$$

$$C_7 = -(R_{eq} + R_s) X_{C, ep} \tau \quad C_8 = C_7 X$$

$$D_1 = 2X_1 X_{C, ep} + R_{eq} R_s + R_{eq} R_r$$

$$D_2 = X_1^2 X_{C, ep} + (R_{eq} R_s + R_{eq} R_r) X_1$$

$$D_3 = -(2X_1 X_{C, ep} \tau + R_{eq} R_s \tau)$$

$$D_4 = -(X_1 X_{C, ep} \tau + R_{eq} R_s) X_1 \tau$$

$$D_5 = -R_r (R_{eq} + R_s) X_{C, ep}$$

感应发电机数据

铭牌数据:	
20HP	△接法
220V	50A
1760RPM	60Hz
参数值	
$R_s = 0.2009\Omega$	$R_r = 0.1384\Omega$
$X_s = 0.8670\Omega$	$X_m = 21.8261\Omega$
$J = 0.2 \text{kgm}^2$	
磁化曲线	
$V_g / F = 1.4 - 0.1377 X_m$	对 $X_m \leq 2.1451 \text{pu}$
$V_g / F = 1.5243 - 0.1917 X_m$	对 $2.1451 \leq X_m \leq 2.6239 \text{pu}$
$V_g / F = 1.9467 - 0.3503 X_m$	对 $2.6239 \leq X_m \leq 3.2218 \text{pu}$
$V_g / F = 0$	对 $X_m > 3.2218 \text{pu}$

风力叶轮数据

叶片数:3	叶轮旋转半径:5m
额定功率 15KW	额定风速:9m/s
水平轴	增速比:30
$C_{Pmax} = 0.461$	$\lambda_n = 3.43$
$J = 7.5 \text{kgm}^2$	

鸣谢

作者衷心感谢 POWERSIM 制造适用的一套新的带 PSIM 自励磁感应发电机模拟样机。

参考文献(略)

译自 IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, VOL.21, NO.2, JUNE 2006

翻译:沈映竹
校核:樊俊杰