

转子角控制模式下负荷跟踪机制的动模试验验证

魏 强¹, 韩学山¹, 郭为民², 杨 明¹, 刘国静¹

(1. 山东大学 电气工程学院, 山东 济南 250061;

2. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 450052)

摘要: 通过动模试验验证了转子角控制的可行性和转子角控制模式下的负荷跟踪机制的有效性, 试验表明, 现有的测量精度和控制技术完全可以实现定转子角控制。试验还表明, 实施转子角控制并不意味着本地发电机要独自承担本地负荷, 在负荷快速增长或者大扰动发生时, 配置传统调速器和配置转子角控制器的发电机都会参与调节, 调整结束后负荷增量会由多个定角度机组共同分担。此外, 如果运行于定转子角模式的发电机到达出力上限, 该发电机就会失去维持角度的能力, 但相邻的发电机可在负荷增长时提供支援, 因此系统频率仍可维持不变。

关键词: 转子角控制; 一次调频; 自动发电控制; 发电机

中图分类号: TM 76

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.04.025

0 引言

近年来, 相量测量装置(PMU)得到了广泛的应用^[1-3], PMU以全球定位系统(GPS)为参考, 可测量得到发电机转子角。在实际系统中, 转子角都在不断波动。这是由于电力系统有功功率控制一直以频率标准为参考, 通过自动发电控制(AGC)完成控制任务^[4-5]。这一控制通过检测频率的偏移, 使发电机组调速机构动作以抑制频率的变化, 这个过程中频率不断变化必然导致发电机转子角处于波动的状态。风电、光伏等可再生能源发电接入后, 仍继续沿用这一控制方式^[6-11], 所以发电机转子角波动程度也随之加剧。

当前电力系统有功功率的控制模式可以认为是变角度模式, 尽管这一模式有其优越性, 但还是存在弊端。随着新能源(如风电和光伏)的广泛接入, 系统频率变化更加频繁无序, 而且特性各异的电源散布在各级电网之中, 也难以对数量繁多、特性各异的被控量进行协调调度; 另一方面, 智能电网的发展导致发、输、配、用环节的界限也不再明晰, 不清晰的输电通路也存在潜在的安全风险。传统的基于频率信号的集中式发电调度与控制方式在决策效率、信道延迟以及频率信号的非同步性方面均出现问题, 不仅难以实现多区域协调控制, 甚至可能成为区域间潮流波动的根源。

在这个背景下, 能够分散自治、不需要调度干预的自动负荷跟踪机制就具有显著的优越性。文献

[12]提出绝对转子角控制的思路, 可以让每个发电机转子都在指定的时刻到达指定角度位置, 从而把各发电机的绝对转子角在GPS确定的旋转坐标系中固定下来。这种做法可以及时跟踪负荷增减, 并在不需要调度干预的情况下维持能量平衡和系统频率恒定。这种做法还会带来其他好处, 如文献[13]已经证明, 实施转子角控制后可以根据就地量测得到区域间振荡信息, 并提供相应的阻尼转矩, 因而可在不利用远方信息的前提下大幅度提高区域间振荡的抑制阻尼比; 文献[14]表明, 由于正常运行时每个发电机都固定在自己的转子目标值上运行, 所以事故发生后, 各发电机可根据当前转子角量测确定自己在电网中的位置并增减有功, 向事故前目标值回归(但不一定能回到扰动前的数值), 以恢复秩序和稳定, 所以这一新模式也会显著地提高电力系统的暂稳极限。

不过, 从某种意义上讲, 转子角控制模式是与现有模式存在很大差异的一种全新模式, 有很多问题有待解答, 例如: 仿真和实际是否存在显著差异, 测量精度是否足够用于控制, 能否同时指定所有发电机的转子角目标值等等。所以, 通过动模试验来证明这种模式的可行性, 是一项必需的基础工作。本文通过动模试验, 对这些问题进行了解答, 证实了转子角控制模式的可行性, 并对新模式下的负荷跟踪机制进行了详细的试验验证, 从而为未来的可能应用奠定了基础。

1 转子角控制的原理

1.1 绝对转子角的测量

近年来, PMU技术得到了长足的发展, 测量精度不断提高, 应用也越来越广泛。新出现的技术使

收稿日期: 2015-02-04; 修回日期: 2016-01-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51477091); 山东省自然科学基金资助项目(ZR2014EEM022)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51477091) and the Natural Science Foundation of Shandong Province(ZR2014EEM022)

PMU 可以利用键相信号直接测量绝对转子角^[15]。(绝对转子角是指发电机 q 轴相对于协调世界时(UTC)整秒确定的旋转参考矢量的角度)。图 1 为这种直接测量法的示意图。图中, q 轴领先 GPS 参考矢量的角度 δ 为绝对转子角(正序机端电压 U 领先 GPS 参考矢量的角度则为正序机端电压绝对角)。

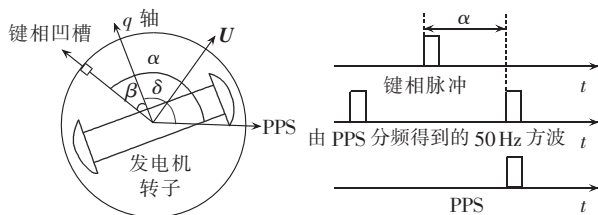


图 1 根据键相信号测量绝对转子角的示意图

Fig.1 Absolute rotor angle measuring based on key-phase signal

通过测量键相脉冲到达时刻和秒脉冲 PPS (Pulse Per Second) 分频得到的精确 50 Hz 脉冲到达时刻间的时间差可以计算得到 α , 再减去初相角 β , 就可以得到绝对转子角。可以看出, 绝对转子角不是转子 q 轴相对于系统中某个其他发电机的角度, 而是在 GPS 确定的旋转坐标系中的角度(相对 PPS 的角度), 因而这个数值的获取不需要任何远方信息。

1.2 转子角控制器的结构和工作原理

在实际运行的电力系统中, 由于系统频率不是非常准确的 50 Hz(或 60 Hz), 所以 PMU 按照前述原理测量得到的转子角会不断变化。频率超过 50 Hz 时转子角逐步增大, 频率低于 50 Hz 则逐步减小。如果系统中存在低频振荡, 不同的发电机角度增加或减少的数值也各不相同。这也是广域测量系统(WAMS)中常见的现象, 即频率变化和低频振荡导致发电机绝对转子角处于变化之中。

然而, 从控制的角度看, 也完全可以转而控制角度, 即通过精确地控制发电机转速, 可以使每次秒脉冲到达时, 发电机转子都转到相同的位置, 这样 PMU 测量得到的绝对转子角将保持不变, 频率也将是精确的 50 Hz(或 60 Hz), 即可同时实现转子角和转速(频率)的无差控制。

图 2 给出了一种使用 PID 精确控制转子角的调速器结构图。图中, s 为拉普拉斯算子; $\omega_0 = 2\pi f_0$ 为弧度制的额定转速; δ 为本地 PMU 测量得到的绝对转子角; δ_{aim} 为调度下发的绝对转子角目标值; K_p 为

比例增益; K_G 为微分增益; T_3 为低通滤波时间常数; T_i 为积分时间; T_{ch} 为高压缸时间常数; T_{th} 为再热器时间常数; F_{hp} 为经再热器后由中低压缸产生的功率比例; T_s 为伺服机构时间常数。 δ_{aim} 的参考点也是 PPS。显然, 在发电机与无穷大系统连接时, δ_{aim} 越大则发电机出力越多。

图 2 所示调速器的原理并不复杂: 如果测量得到的发电机转子角落后(小于指定目标值), 就把汽轮机调门开大一些, 根据摇摆方程可知, 此时发电机转速将会上升, 转子角也会随之加大, 并逐步回归期望值; 反之亦然。

1.3 转子角控制器和传统调速器的比较

现有的电力系统通过一次调频和 AGC 来跟踪负荷变化, 随时维持负荷和发电间的平衡。如果要在电网中实施转子角控制, 就必须用转子角控制器替换传统的调速器。一次调频功能也随之消失。不仅如此, 转子角控制器内没有接收调度功率指令 $P_{Loadref}$ 的接口, 也就不可能以传统的方式实现 AGC。为此, 有必要对转子角控制模式下电网如何跟踪负荷进行进一步分析。

图 2 所示控制框图比较复杂。图中积分路径中的低通模块和输出前的补偿模块主要为改善阻尼转矩而设置, 在稳态时不需要考虑。为简单起见, 可以将不包括补偿模块的转子角控制器输出表示为:

$$\mu = K_p \Delta\delta + \frac{K_G}{\omega_0} s \Delta\delta + \frac{1}{s T_i} \Delta\delta \quad (1)$$

其中, $\Delta\delta$ 为 PMU 量测得到绝对转子角和调度下发的转子角目标值的差值, 如式(2)所示。

$$\Delta\delta = \delta_{aim} - \delta \quad (2)$$

作为比较, 式(3)同时给出了传统调速器的输出:

$$\mu = -\frac{1}{R} \Delta\omega + P_{Loadref} \quad (3)$$

可以知道, 在负荷和发电精确相等且转子角量测也等于目标值的瞬间, 转子角控制器只有积分路径有输出, 因此 $\frac{1}{s T_i} \Delta\delta$ 就类似于传统调速器的 $P_{Loadref}$ 。

不过, 传统控制器根据频率增加功率的部分 $-\frac{1}{R} \Delta\omega$ 由 $K_p \Delta\delta + \frac{K_G}{\omega_0} s \Delta\delta$ 代替, 即在负荷变化后, 转子角控制器会同时根据频率和角度增减功率。

在使用传统控制器时, 如果负荷增加, 则系统最终会稳定在一个稍低的频率上(否则根据频率差增发

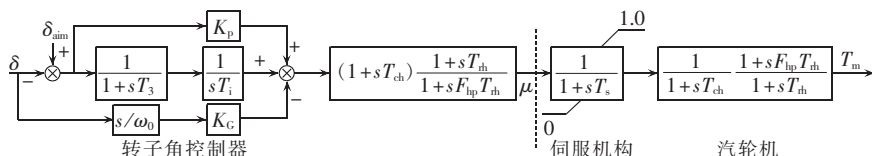


图 2 转子角控制器结构图

Fig.2 Structure of rotor angle controller

的部分会回归到 0),即传统调速器是根据频率的有差控制。

使用转子角控制器后,在负荷增加的初期,角度和频率都会下降,所以控制器内比例和微分路径都会增发功率,不过随着频率逐步恢复额定值,微分路径输出会减小到 0,但根据角度差增发的部分仍会保留下来,即角度会稳定在新的更为滞后的数值上,新模式在扰动后一段时间内是根据角度的有差控制(但是频率的无差控制)。随后,积分路径会逐步发挥作用,再让角度逐步回归目标值,最终实现角度的无差控制。

2 负荷跟踪机制的动模试验验证

2.1 硬件平台

动模试验在山东大学动模试验室完成,试验中使用了 2 台 12 kW 的交流发电机,原动机为直流电动机。2 台发电机的高压母线通过线路连接,负荷则通过降压变压器接在其中一台发电机的高压母线上。试验接线如图 3 所示。

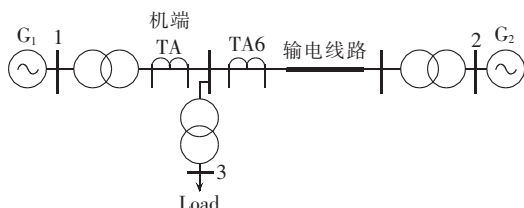


图 3 动模试验接线图

Fig.3 Single-line diagram of experiment system

图 4 是测量和控制接线示意图。其中,角度测量由发电机飞轮上的贴纸和光纤传感器配合实现,每次贴纸转过传感器探头时,传感器都会发出一个脉冲给 PMU(这个信号就等同于汽轮机的键相信号),再根据 2.1 节所述原理 PMU 即可计算得到绝对转子角。由于光纤传感器在高速模式下响应时间为 50 μ s,所以传感器误差小于 0.9°,加上 PMU 测量误差 0.144°,合计理论误差在 1° 左右(实际短时测量漂移仅为 0.2° 左右)。

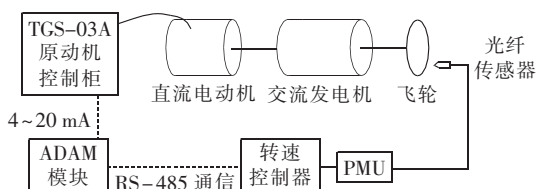


图 4 动模试验测量和控制结构

Fig.4 Measuring and control loop of experiment system

PMU 得到转子角后,送给转速控制器。控制器内部逻辑和图 2 所示结构类似,但通过模式切换可以选择定功率模式、一次调频模式(闭锁比例和积分路径)或者转子角控制模式。控制器的输出指令则

通过 RS-485 通信线发送给研华的 ADAM 模块,再以 4~20 mA 的电流信号输出到直流电动机控制柜,最终达到改变直流电动机控制柜电流环定值和电动机转矩的目的。

这个控制闭环并没有显式地模拟汽轮机的某些环节(没有对应再热器和伺服机构的惯性环节)。这是因为本文仿真目的是验证负荷跟踪机制(而非暂态过程),而在准稳态过程中,转子角控制器内的补偿环节可以抵消对应再热器和中低压缸的环节。此外,RS-485 传输和 ADAM 模块存在纯时延,直流电动机控制回路的时间常数又正好对应伺服机构、汽门和高压缸的时间常数,所以最终效果应与实际汽轮机是相当的。

2.2 在多机系统中启动转子角控制

启动转子角控制可以有 2 种方式:一种方式是在黑启动时,让投入运行的第一台发电机直接进入转子角控制模式,随后各发电机再依次并网即可;另一种方式则是运行中的多台发电机在某一时刻同时投入转子角控制器。下面分别给出 2 种方式启动转子角控制的试验结果(图中角度数值由 PMU 记录后再由 MATLAB 作图,因此没有使用实际时间)。

图 5 为动模试验时一台发电机首先投入转子角控制,随后另外一台发电机并网的试验结果曲线。由于增加了 PPS 作为坐标系参考,所以两机系统可以画出 2 条角度曲线。图中 δ_1 、 δ_2 分别为发电机 G_1 和 G_2 的转子位置量测(未扣除初相角,否则并网后曲线会压在一起)。

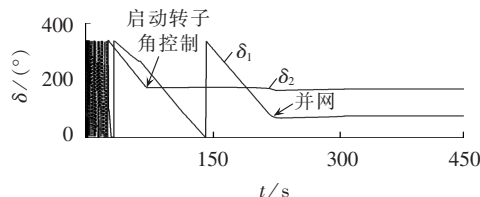


图 5 一台发电机投入转子角控制后
另一台发电机并网的试验结果

Fig.5 Experimental results when one generator begins operating in rotor angle control mode and another generator is then integrated into grid

从图中可以看出,在 $t=71$ s 时,发电机 G_1 先启动角度控制(以该时刻的转子位置量测作为目标值),转子位置在 PPS 确定的旋转坐标系中不再变化。约 150 s 后 2 台发电机并网,并网时发电机 G_2 的调速器为定功率模式,但并网后发电机 G_2 的转子位置就不再变化(而在目前实际运行的电网中,任何并网发电机在 GPS 坐标系中的转子角度位置都随频率波动而不断波动)。

图 6 给出了已处于并网运行状态且带负载的两机系统启动转子角控制的角度记录。试验开始前,2

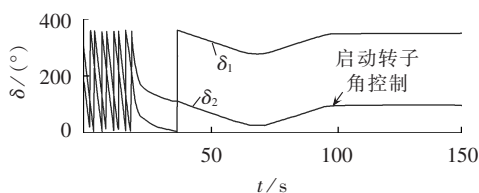


图 6 双机系统由变角度模式转为定角度模式的角度记录

Fig.6 Rotor angle records when two-machine system operates from variable rotor angle control mode to constant rotor angle control mode

台发电机的调速器仅包括一次调频环节(角度的微分环节),电网运行在传统的变角度模式下,且通过手工增减指令使运行频率距离额定频率很近。在 $t=94.4\text{ s}$ 时将发电机 G_1 的控制器转入角度控制模式(以该时刻的转子位置量测作为目标值),发电机 G_2 仍保持传统的一次调频模式。从结果曲线可以看出,系统在经过一个短暂的过渡过程后就稳定下来,2 台发电机的转子角都不再变化,实现了由变角度到定角度的转换。

第一个试验表明,如果电网已经运行在定角度模式,则新并网发电机的转子角度在并网后也会固定下来。第二个试验则表明,假如电网中发生非常大的扰动以致不得不暂时转入传统变角度模式,在扰动平息且频率基本恢复后,电网仍可以很方便地重新转入定角度模式。

2.3 转子角控制模式下的负荷跟踪

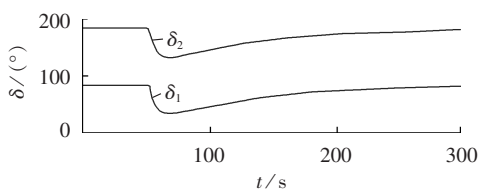
2.3.1 混合模式下的负荷跟踪

考虑 2 台发电机仅有 1 台启动转子角控制的场景(另外一台发电机使用传统调速器,即仅包括对应角度微分的一次调频环节,不包括比例和积分环节)。

在 $t=50\text{ s}$ 时,将负荷增加 2 kW ,并记录各发电机的转子角度和给负荷提供的电流(由机端 TA、TA6 得到)变化曲线,结果见图 7(由于负荷为纯电阻,所以电流和功率等比例变化,没有给出功率是因为使用 2 个互感器结果进行计算会引入更大误差,此外,该图及后续录波图宽度对应时间长度均小于角度曲线时间长度)。

从图中可以看出,负荷增加后,2 台发电机的角度都开始落后,频率也有短暂的下降,所以 2 台发电机都开始增加输出功率。随后,由于频率逐步向额定值回归,发电机 G_2 增发的功率也逐步减少,而发电机 G_1 逐渐增多。最终,频率恢复到 50 Hz 后,发电机 G_2 的出力回归到了初始值,而发电机 G_1 完全承担了负荷增量部分,在没有 AGC 参与的前提下实现了功率平衡和频率的无差调节。

这个试验表明电网中的多台发电机可以同时运行在不同模式下(定角度模式或传统的一次调频模式甚至定功率模式)。在扰动后,运行于传统一次调



(a) 绝对转子角



(b) 电流

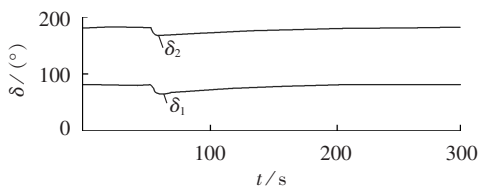
图 7 混合模式下负荷跟踪过程角度和电流记录

Fig.7 Rotor angle and current records during load following in mixed mode

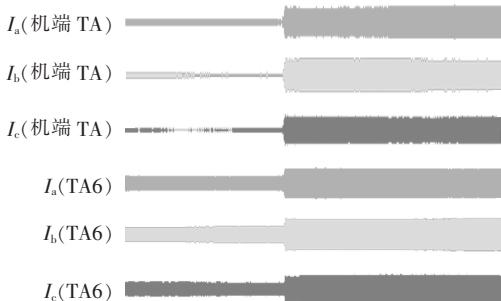
频模式的发电机也可以对电网提供短暂支援,但是增发功率最终会完全消失,负荷增量仅由定转子角模式运行的发电机承担。

2.3.2 单一模式下的负荷跟踪

如果 2 台发电机都运行在定角度模式下,则试验结果又会显著不同,在 $t=50\text{ s}$ 时,将负荷增加 2 kW ,并记录各发电机的转子角度和给负荷提供的电流变化曲线,结果见图 8。从图中可以看出,负荷增加后,2 台发电机的角度都开始落后,频率也有短暂的下降,所以 2 台发电机都开始增加输出功率,频率和角度相继恢复。最终 2 台发电机的转子角都恢复到扰



(a) 绝对转子角



(b) 电流

图 8 单一模式下负荷跟踪过程角度和电流记录

Fig.8 Rotor angle and current records during load following in single mode

动前的数值,频率也恢复到 50 Hz,在没有 AGC 参与的前提下实现了功率平衡和频率的无差调节。

和 2.3.1 节结果进行比较,可以看到:首先,由于参与角度控制的发电机更多,所以过渡过程中发电机角度滞后的幅度更小一些;其次,2 台发电机都承担了部分负荷增量。这个实验也表明,即使负荷挂在某个定转子角的发电机的高压母线上,该负荷的增量部分也不一定都由该发电机承担。

2.3.3 定角度发电机到达有功上限后的情形

在多机系统中使用转子角控制时,不可避免会碰到某台发电机到达功率上限的情况。显然,此时发电机会失去维持转子角度不变的能力,原本该由此发电机承担的负荷就会转由相邻发电机承担。

假设试验系统中,发电机 G_1 到达了有功上限,在 $t=120\text{ s}$ 时和 $t=475\text{ s}$ 时,分 2 次各将负荷增加 2 kW,并记录各发电机的转子角度、两机间转子角度差(扣除了初相角)和给负荷提供的电流变化曲线,结果见图 9(录波图分为 2 个子图显示)。

可以看出,由于发电机 G_1 已经到达有功上限,在负荷增长时,该发电机转为恒功率机组,不再增发功率(电流瞬时波动则由定子线圈储能提供)。因此,发电机 G_1 的转子角逐步落后。与此同时,本应由发电机 G_1 承担的负荷都自动地转由发电机 G_2 承担。因为发电机 G_2 有功仍有充足的裕度,所以其转子角能够维持不变,且同时确保了系统内的功率平衡,保证频率维持在额定频率上。

在本节试验中,发电机 G_1 的转子角度是随着负荷增长而被动地逐步落后的。不过,在实际运行中,当某个发电机接近出力上限时,调度应主动更改该发电机和相邻机组的角度目标值,从而改变各发电机出力和潮流分布,避免发电机到达出力上限。这样各发电机可提供的备用和支援能力才不会缩小。

值得注意的是,本节试验还说明,实施转子角控制后,尽管控制器总是力图将转子角维持在目标值上,但不少因素会使实际角度偏离目标值,即角度并不是任何时刻都被刚性固定于目标值上的,而会在目标值附近浮动,尤其在大扰动后更是如此(大扰动再进入稳态后事故地点附近发电机的新运行点均会偏离目标值)。这就为运行和控制提供了一定的缓冲余地。

3 结论

为了验证转子角控制的可行性及相应的负荷跟踪机制,在山东大学动模试验室进行了相关的动模试验。试验表明,现有的测量精度和控制技术完全可以实现定转子角控制,并且可以同时指定多个发电机的目标转子角。

动模试验表明,发电机并入运行于定转子角模式的电网后转子角亦随之固定下来,此外,如果电网在大扰动后暂时变为变频变角度模式,也可以在频率偏差较小时很方便地重新启动定角度模式。

动模试验还表明,电网中多种模式(定功率/仅有一次调频/定角度)的发电机可以并列运行,在负荷快速增长或者大扰动发生时,电网中的发电机都会参与调节,但调整结束后负荷增量仅由定角度机组分担。定角度机组越多,则调整过程中发电机角度滞后越少。此外,如果运行于定转子角模式的发电机到达出力上限,该发电机就会失去维持角度的能力,但相邻的发电机可在负荷增长时提供支援,因此系统频率仍可维持不变。

本文提出的新的控制模式在带来益处的同时,也会带来一些新的问题,例如汽轮机调整过于频繁、影响机械寿命等,需要寻找更好的控制手段加以解决。

致 谢

国网河南省电力公司电力科学研究院提供了试

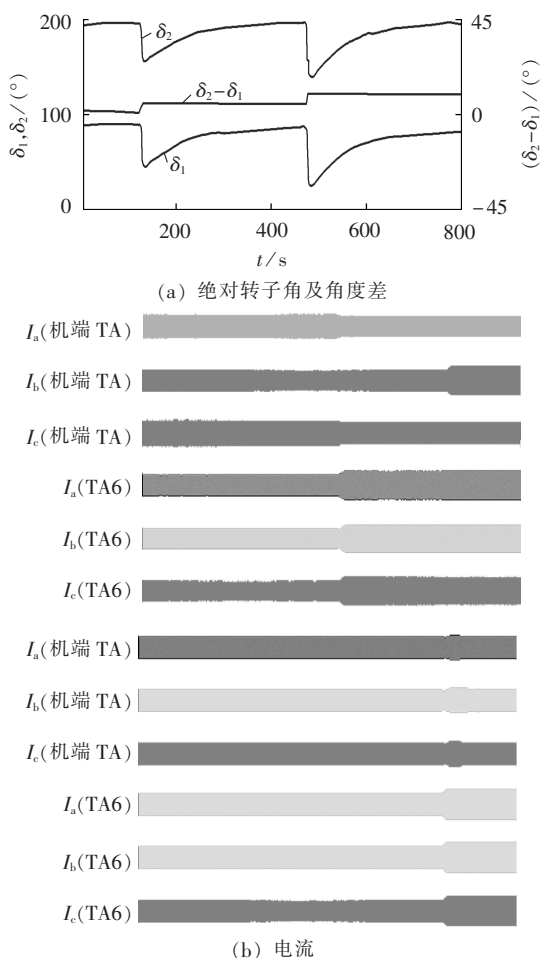


图 9 定角度发电机到达有功上限后负荷跟踪过程角度和电流记录

Fig.9 Rotor angle and current records during load following when generator with constant angle control reaches upper limit of active power

验用 PMU 和转子角控制器,山东大学电气工程学院邹贵彬、于少舟两位老师提供了部分试验需要的资料 and 材料,在此表示感谢!

参考文献:

- [1] ZHOU N, ZHU J, LIAO Y. Implementation of a new phase angle measurement algorithm [C]//IEEE Power and Energy Society General Meeting (PES). Vancouver, Canada; IEEE, 2013: 1-5.
- [2] PHADKE A G, de MORAES R M. The wide world of wide-area measurement[J]. Power and Energy Magazine, 2008, 6(5): 52-65.
- [3] de la REE J, CENTENO V, THORP J S, et al. Synchronized phasor measurement applications in power systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2010, 1(1): 20-27.
- [4] JALEELI N, VANSLYCK L S, EWART D N, et al. Understanding automatic generation control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1992, 7(3): 1106-1122.
- [5] VANSLYCK L S, JALEELI N, KELLEY W R. A comprehensive shakedown of an automatic generation control process[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1989, 4(2): 771-781.
- [6] VIDYANANDAN K V, SENROY N. Primary frequency regulation by deloaded wind turbines using variable droop[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 837-846.
- [7] de ALMEIDA R G, PEAS LOPES J A. Participation of doubly fed induction wind generators in system frequency regulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(3): 944-950.
- [8] MAURICIO J M, MARANO A, GOMEZ-EXPOSITO A, et al. Frequency regulation contribution through variable-speed wind energy conversion systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(1): 173-180.
- [9] DIAZ G, GONZALEZ-MORAN C, GOMEZ-ALEIXANDRE J, et al. Scheduling of droop coefficients for frequency and voltage regulation in isolated microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(1): 489-496.
- [10] MA H T, CHOWDHURY B H. Working towards frequency regulation with wind plants: combined control approaches [J]. IET Renewable Power Generation, 2010, 4(4): 308-316.
- [11] 陈炜, 艾欣, 吴涛, 等. 光伏并网发电系统对电网的影响研究综述[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(2): 26-32, 39.

述[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(2): 26-32, 39.

CHEN Wei, AI Xin, WU Tao, et al. Influence of grid-connected photovoltaic system on power network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(2): 26-32, 39.

- [12] WEI Q, GUO W M, HE N Q, et al. A new method to eliminate low-frequency oscillations [C]//PES 2013 General Meeting. Vancouver, Canada; [s.n.], 2013: 1-5.
 - [13] WEI Q, HAN X S, GUO W M, et al. The principle of absolute rotor angle control and its effect on suppressing inter-area low frequency oscillations[J]. International Journal of Electric Power & Energy System, 2014, 63: 1039-1046.
 - [14] WEI Q, GUO W M, HAN X S, et al. Analysis on the effect of rotor angle control for transient stability enhancement[C]//ISGT Europe 2014. Istanbul, Turkey; [s.n.], 2014: 1-6.
 - [15] 胡炯, 吴雅璐, 李建, 等. 同步发电机绝对转子角测量方法研究[J]. 电网技术, 2006, 30(增刊): 354-357.
- HU Jiong, WU Yalu, LI Jian, et al. Research of synchronous generator angle measurement[J]. Power System Technology, 2006, 30(Supplement): 354-357.

作者简介:



魏 强

魏 强(1977—),男,河南新乡人,高级工程师,博士,主要研究方向为电力系统稳定与控制 and 智能电网(E-mail: wei_tsiang@163.com);

韩学山(1959—),男,辽宁大连人,教授,博士研究生导师,博士,主要从事电力系统运行与控制领域的研究和教学工作(E-mail: xshan@sdu.edu.cn);

郭为民(1971—),男,河南内乡人,高级工程师,主要研究方向为源网协调及电力系统分析与控制(E-mail: guoweimin@ha.sgcc.com.cn);

杨 明(1980—),男,山东烟台人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统分析与控制(E-mail: myang@sdu.edu.cn);

刘国静(1988—),男,山东聊城人,博士研究生,主要研究方向为电力系统协同调度(E-mail: liu.guojing@qq.com)。

Experimental verification of load balancing mechanism in rotor angle control mode

WEI Qiang¹, HAN Xueshan¹, GUO Weimin², YANG Ming¹, LIU Guojing¹

(1. College of Electrical Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China;

2. Electric Power Research Institute of State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: The feasibility of rotor angle control and the effectiveness of load balancing mechanism in the rotor angle control mode are verified by experiments and the experimental results show that, the present measurement accuracy and control technology can completely realize the rotor angle control; the local load is not born by the local generator alone in the rotor angle control mode; when load increases quickly or large disturbance occurs, the generators with speed governor or rotor angle controller will all participate in the load adjustment and the load increment will be shared after the adjustment among multiple generators with constant rotor angle. The generator with constant rotor angle may lose the ability to maintain the rotor angle if its upper limit of power output is violated, but the adjacent generators will provide supports during the load growth to maintain the system frequency.

Key words: rotor angle control; primary frequency control; AGC; electric generators