

双变速泵的动态行为

涡轮发电站

⁽¹⁾Y.Pannatier,⁽²⁾C. Nicolet,⁽¹⁾B. Kawkabani,^(*)(¹)J.-J. Simond,^(*)(¹)Ph. Allenbach
(*)电气和电子工程师学会会员

⁽¹⁾洛桑联邦理工学院, EPFL-STI-IEL-LME

⁽¹⁾ELG 132, Station 11, CH-1015 Lausanne, Switzerland, Phone: (+41) 21 693 46 90, e-mail: yves.pannatier@epfl.ch

⁽²⁾Power Vision Engineering Sàrl, 瑞士, CH-1024 Ecublens

摘要– 本文介绍了利用 SIMSEN 软件对一个虚构的 2x320 兆瓦变速泵-涡轮发电厂（包括液压系统、电气设备、转动惯量和控制系统）的动态行为进行建模、仿真和分析。首先，介绍了电站液压和电气元件的建模。然后介绍伪连续近似。它包括对发电厂电气部分的简化。由于这种简化，模拟时间可以大大缩短（~ 60 倍）。通过仿真比较了完整模型和简化模型，并讨论了伪连续近似的有效性。最后，对发电模式下的两种控制策略进行了仿真比较。

I. 引言

变速水泵-涡轮机组因其高度的运行灵活性，如今已成为提高电网稳定性的一种有效方法。事实上，变速水泵-水轮机组在抽水和发电两种模式下都具有一些优势，例如：(i) 在抽水模式下可以进行有功功率控制，(ii) 提高效率：(i) 在抽水模式下可进行有功功率控制，(ii) 在发电模式下可提高效率并扩大运行范围，尤其是在部分负荷情况下，(iii) 通过无功功率控制提高电网稳定性，(iv) 通过向电网瞬时注入有功功率（飞轮效应）提高电网稳定性。出于运行稳定性的目的，提高动态性能是主要关注点，其优化需要可靠的仿真模型。

II. 发电厂模型

由液压和电气系统组成的发电厂完整模型如图 1 所示。

A. 液压系统建模

水力系统的布局如图 2 所示，由一个上游水库、一条 600 米长的廊道、一个直径 18 米的突水槽、一条 900 米长的水闸和 320 兆瓦混流式水泵水轮机组成。水泵水轮机的主要参数见表 I，水泵水轮机的特征见图 3。从图中可以看出，这些水轮机在 1st 和 4th 象限内呈现所谓的 S 型曲线。

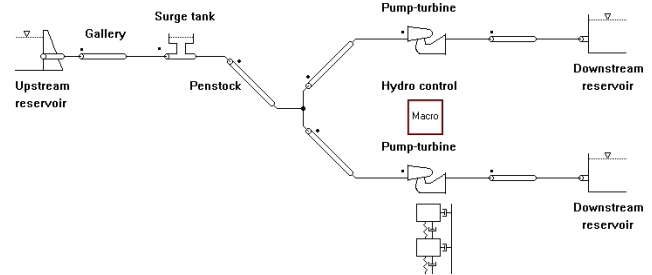


图 2. 发电厂的液压系统 表 I
泵-涡轮机的额定值

H_n [m]	Q_n [m ³ /s]	P_n [MW]	H_n [tr/min]	v [-]	J [Kgm ²]
552	64	320	450	0.2	1.8605e6

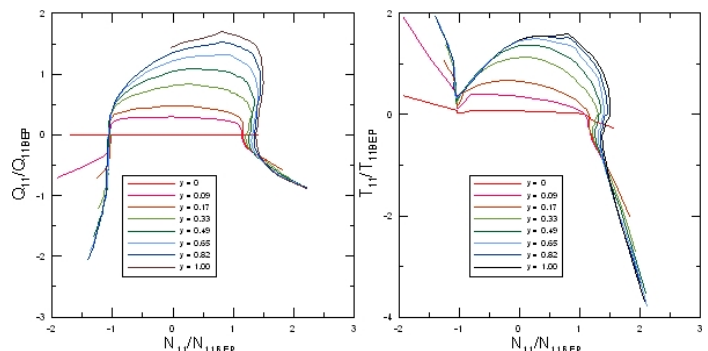


图 3. 泵-涡轮特性

2008 年国际
N₁₁、
扬程 H 和

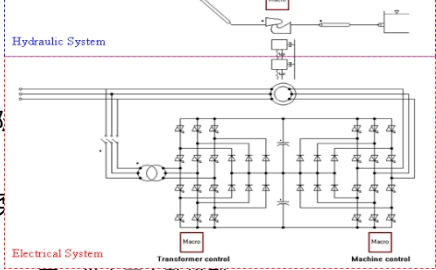


图 1. 发电厂完整模型

扭矩 T、
数，如下

所示：

文件编号
754

$$N_{11} = \frac{N \cdot D_{ref}}{\sqrt{H}} \quad Q_{11} = \frac{Q}{\sqrt{\square} \cdot D_{ref}^2} \quad T_{11} = \frac{T}{HD^3} \quad (1)$$

档
号

不同液压元件的建模基于电气类比。例如，本节将介绍管道建模的必要步骤。

假设横截面上的压力和速度分布均匀，并忽略对流项，则长度为 dx 、横截面为 A 、波速为 a 的充满水的基本管道的一维动量和连续性平衡方程（见图 4）可转换为以下双曲偏微分方程组[6]：

$$\begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{a^2}{gA} \cdot \frac{\partial Q}{\partial t} &= 0 \\ \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{1}{gA} \cdot \frac{\partial Q}{\partial t} - \frac{\lambda |Q|}{2gDA^2} + Q &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

系统 (2) 采用有限差分法求解，空间采用 1st 阶居中方案离散化，放电变量采用 Lax 方案。如图 5 所示，这种方法可将常微分方程系统表示为 T 型等效方案 [1]、[3]、[5]。该等效方案的 RLC 参数为

$$R = \frac{\lambda \cdot dx}{2gDA^2} \quad L = \frac{dx}{gA} \quad C = \frac{g \cdot A \cdot dx}{a^2} \quad (3)$$

其中， λ 是局部损耗系数。液压电阻 R 、液压电感 L 和液压电容 C 分别对应于能量损失、惯性和存储效应。

根据图 5 的等效方案，长度为 L 的管道模型由一系列 n_b 元素组成。与该模型相关的方程组是利用基尔霍夫定律建立的。

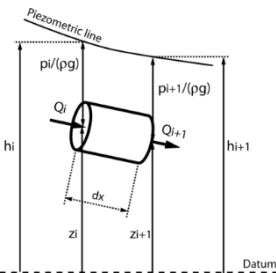


图 4.长度为 dx 的基本液压管

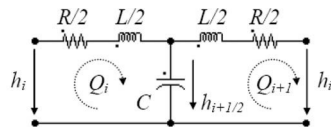


图 5.长度为 dx 的基本管道的等效电路。

如表 II 所示，基于水力部件等效方案的建模方法已扩展至所有标准水力部件，如涌流槽和混流式水泵-涡轮机，见

表 II
利用相关等效方案建立水力部件模型

Component	Hydraulic scheme	Electrical equivalent scheme	Parameters
Generalized pipe			$R = \frac{dx \lambda}{2gDA^2}$ $L = \frac{dx}{gA}$ $C = \frac{gDA^2}{a^2}$ $R_{\text{in}} = \frac{\mu}{\rho g A dx}$
Surge tank			$R_d = \frac{K_d(Q) Q }{2gA^2}$ $C_{ST} = A_{ST}(h_c)$
Francis pump-turbine			$H = H(W_p(Q, N))$ $T = T(W_p(Q, N))$ $R_t = R_t(W_p(Q, N))$ $L_t = \frac{I_{\text{me}}}{gA}$
V_g : volume of gas [m ³] W_p : turbine head characteristic [-] I_{me} : turbine equivalent length [m] h_c : pressure of gas [m] W_p : turbine torque characteristic [-] μ : viscosity of the fluid or material [Pa·s]			

这些模型最终在 EPFL 的 SIMSEN 软件中实现，该软件是为模拟水电站的动态行为而开发的[2]，[4]。SIMSEN 采用 Runge-Kutta 4th 阶程序对整个系统进行时域积分。

B. 电力系统建模

完整的电气系统模型包括一台双馈感应发电机，其主要参数如下

如表 III 所示，转子侧采用 VSI（电压源逆变器）级联。该电气系统可分为两个部分，即变压器部分和机器部分，如图 6 所示。

表 III
发电机额定值

P_n [tmin]	S_n [MVA]	U_n [kV]	f_n [Hz]	$2p$ [-]	s_{max} [%]
450	380	18	60	16	7

[2]。

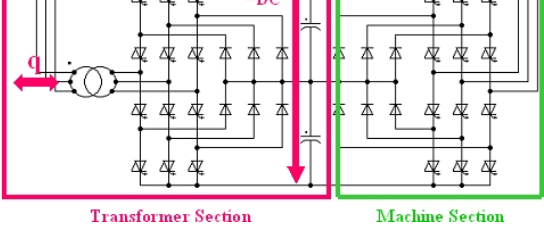


图 6.发电厂电气系统

变压器部分作为静态可变补偿器（SVC）运行，其主要作用是 与电网交换无功功率。无功功率和电容器电压可通过左侧变流器作用于变压器一次侧电流进行控制。控制结构如图 7 所示，参见 [8]。

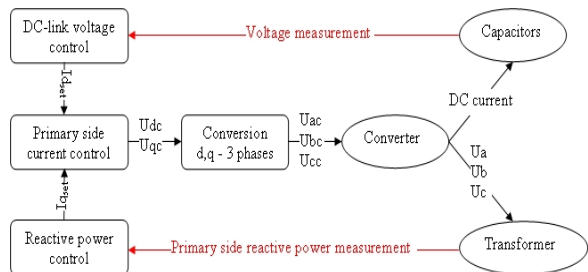


图 7. 变压器部分的控制结构

机器部分的主要作用是控制机器的速度。通过右侧变流器作用于转子电流，可以控制机器的速度和定子无功功率。控制结构如图 8 所示，参见 [8]。

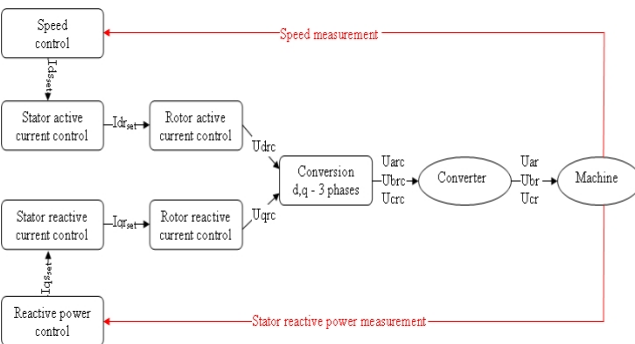


图 8. 机床部分的控制结构

III. 伪连续近似

电压源逆变器需要非常小的积分步长，因此仿真耗时昂贵。通过使用伪连续近似级联，即用三个受控电压源取代转子侧的电压源逆变器，并抑制变压器侧的逆变器，可以大大减少仿真时间。由于转子与电网之间不再有物理联系，见图 9，因此必须通过机器控制中的一个计算模块来考虑转子与电网之间的功率传输。

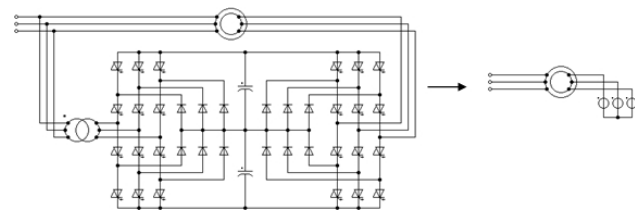


图 9. 完整模型和伪连续模型

IV. 控制策略

在发电模式下，研究了两种控制策略。第一种策略如图 10 所示，考虑了水轮机功率调节器和发电机转速控制器，见 [7]。

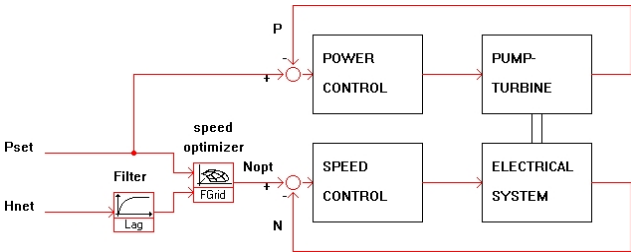


图 10: 发电模式下的第一种策略

速度控制结构如图 8 所示。功率控制详见图 11，由一个 PI 型调节器组成，其输出通过伺服电机作用于导叶开口。伺服电机的最大位移速度由速率限制器固定。

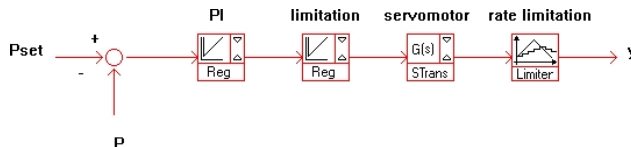


图 11. 第一种策略：功率控制结构

第二种策略如图 12 所示，基于涡轮机调速器和发电机功率率控制器，见 [7]。

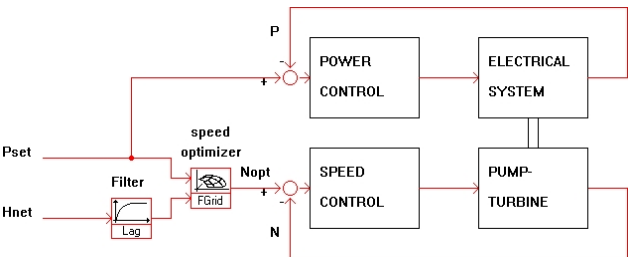
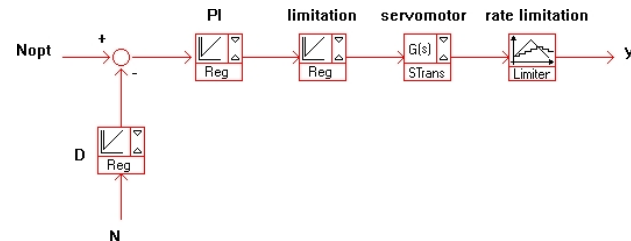


图 12: 发电模式下的第二种策略

只需将速度控制块替换为功率控制块，就可从图 8 详细说明的结构中推导出功率控制结构。速度控制如图 13 所示，包括一个 PID 型调节器，如前所述，作用于导叶开口。



功率设定点由电网条件决定，而转速设定点则由转速优化器计算，以最大限度地提高水轮机的效率。转速优化器是一个曲面，代表了最佳转速与功率和扬程的函数关系。该曲面如图 14 所示，由图 3 中定义的水泵-水轮机特性计算得出。根据无量纲水轮机特性计算出最佳转速，并通过内插法推导出不同转速 N_i 下水头和机械功率的效率山形图。对于水轮机运行范围内的每种水头和功率组合，都会选择效率最高的转速。这种方法提供了图 14 的转速查询表。可以发现，正如预期的那样，在低水头条件下，小功率时的最佳转速最低，而在高水头条件下，大功率时的最佳转速最高。

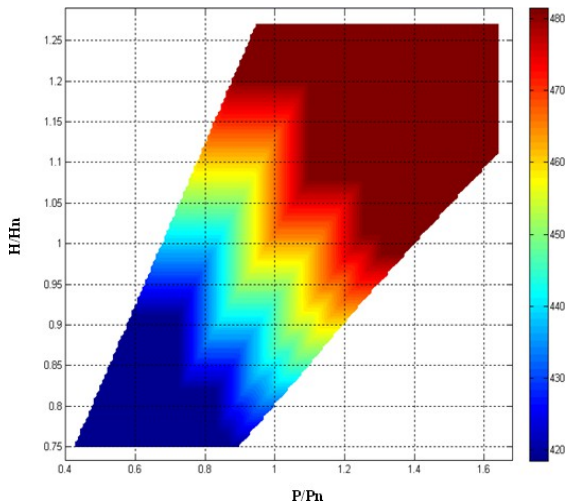


图 14.速度查询表 $N=N(H/H_n, P/P_n)$

V. 模拟结果

仿真结果显示了发电模式下策略 1 和策略 2 在有功功率设定点降低时的情况。如图 15 所示，转速优化器根据新的功率设定点和水头计算出新的转速设定点。

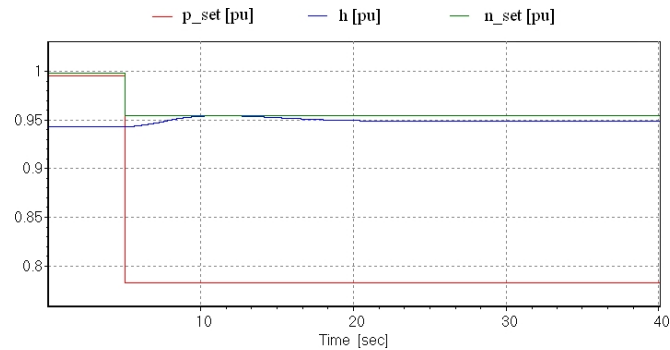


图 15.功率设定点（红色）、过滤水头（蓝色）和速度设定点（绿色）

A. 策略1

关于第一种策略，由于速度由电气系统控制，新的速度设定点可在约 4 秒内快速达到（图 16）。

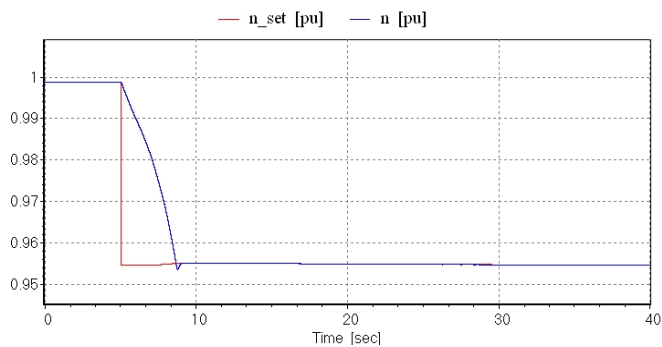
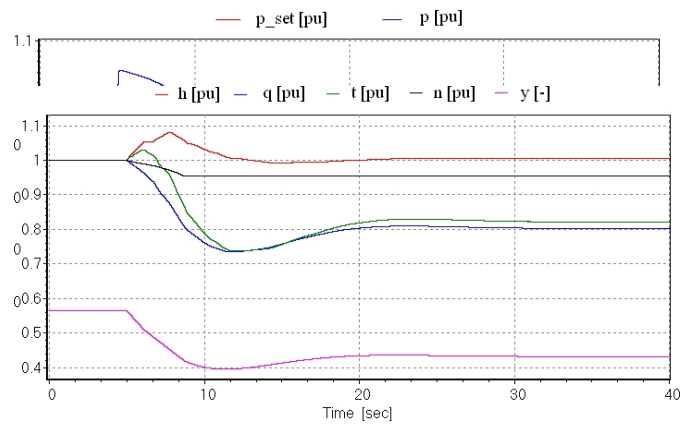


图 16.速度设定点（红色）和速度（蓝色）（单位： pu）

转速的降低会将旋转惯性产生的动能传递给电网，从而为电网注入电能。这种现象被称为飞轮效应（图 17）。然后，如图 17 所示，功率由泵-涡轮机缓慢调节。第一种策略的模拟结果表明，有功功率在设定点变化后的瞬态行为（尤其是图 17 所示的有功功率）是不可接受的，因此不能采用这种策略。为了避免有功功率的瞬态变化，有必要对速度控制器的设定点进行速率限制。图 18 以单位表示水头 h 、排量 q 、扭矩 t 、转速 n 和水轮机导叶开度 y 。

图 17.功率设定点（红色）和功率（蓝色）（单位： pu）

图 18.图 18 中水泵-涡轮机的瞬态特性（pu）



为了验证伪连续近似，可以将这些结果与考虑转子级联完整模型时获得的结果进行比较（图 19）。

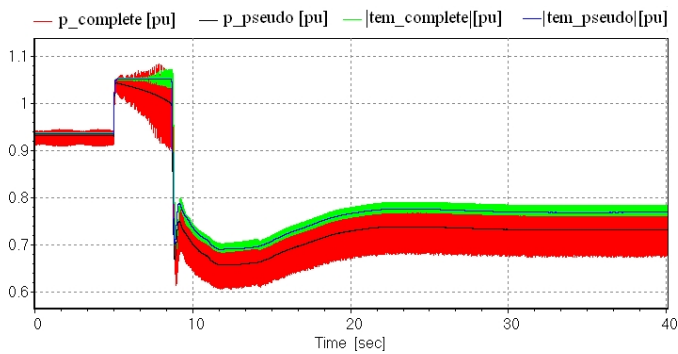


图 19.用伪连续模型和完整模型分别获得的功率和电磁转矩（绝对值）比较

我们可以发现，这两个模型得出的结果非常吻合。使用这种伪连续模型与使用完整模型相比，计算时间缩短了 60 倍。另一方面，完整模型允许对变流器引起的谐波进行精确分析。事实上，VSI 转换器会产生以下谐波范围 $6k \pm 1$ 在转子电流中，其基波频率为 $s \cdot f_n = s \cdot 60$ [赫兹]（图 20）。这些电流谐波导致范围谐波 $6k$ 在电磁扭矩（图 21）。

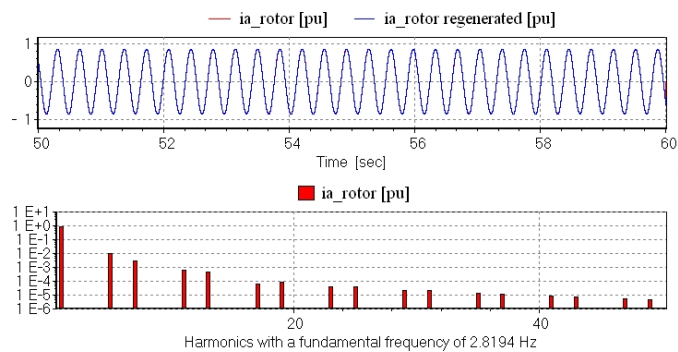


图 20.完整模型：a相转子电流的频率分析

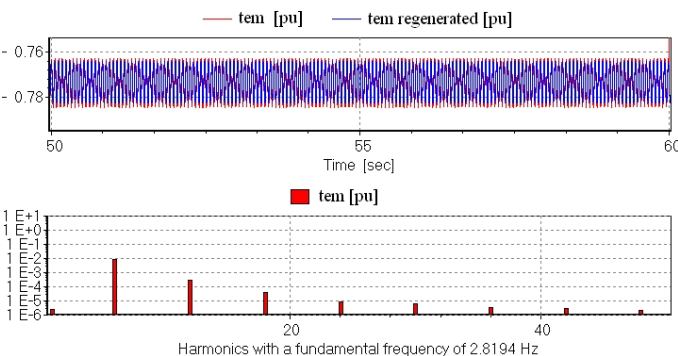


图 21.完整模型：电磁扭矩的频率分析

B. 策略2

关于第二种策略，新的功率设定点会在 0.3 秒内快速达到，因为功率是由电气系统控制的，如图 22 所示。

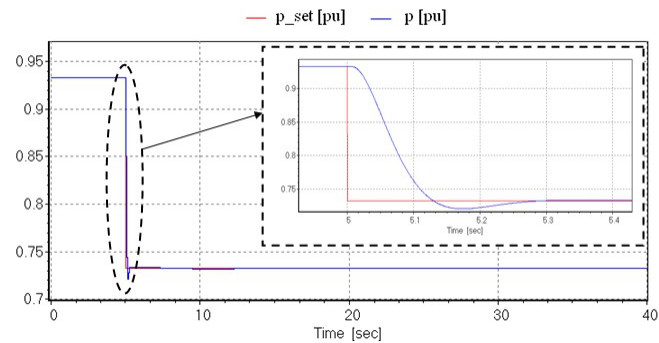


图 22.功率设定点（红色）和功率（蓝色）（单位： pu）

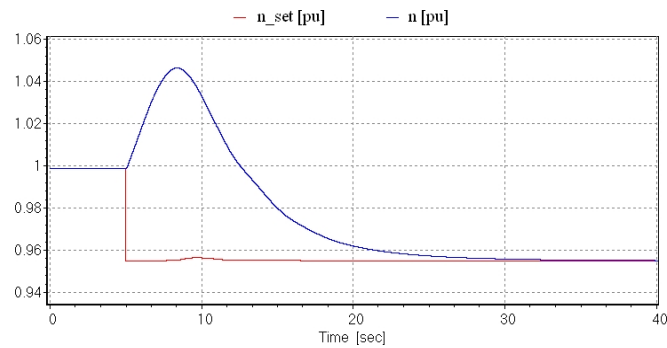


图 23.速度设定点（红色）和速度（蓝色）（单位： pu）

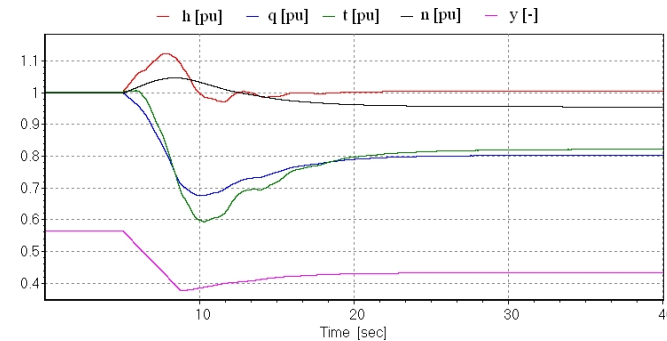


图 24.图 24 中水泵-涡轮机的瞬态特性（pu）

功率的减小导致旋转惯性中动能的积累，从而使机器加速。然后，如图 23 和 24 所示，泵-涡轮机缓慢地调节转速。

将这些结果与转子级联完整模型得出的结果进行比较，证实了伪连续近似方法的有效性（图 25 和 26）。

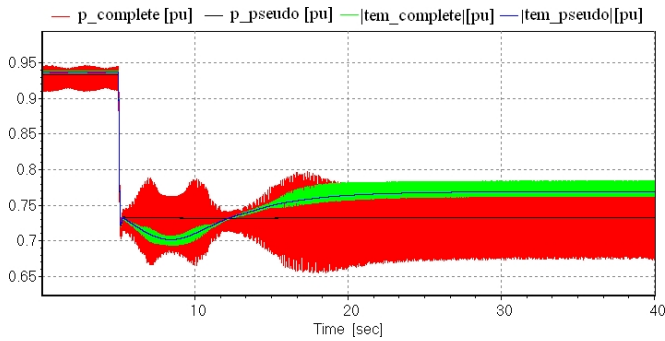


图 25. 用伪连续模型和完整模型分别获得的功率和电磁转矩（绝对值）比较

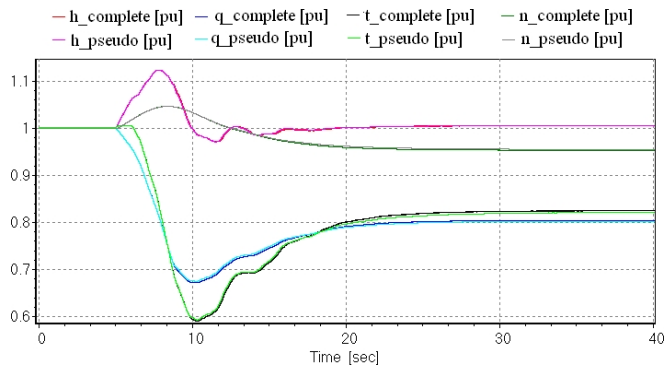


图 26. 利用伪连续模型和完整模型得出的泵涡轮机瞬态行为对比图

C. 发电模式下两种策略的比较

图 27 和图 28 分别显示了策略 1 和策略 2 在有功转速和转速变化方面的动态表现。

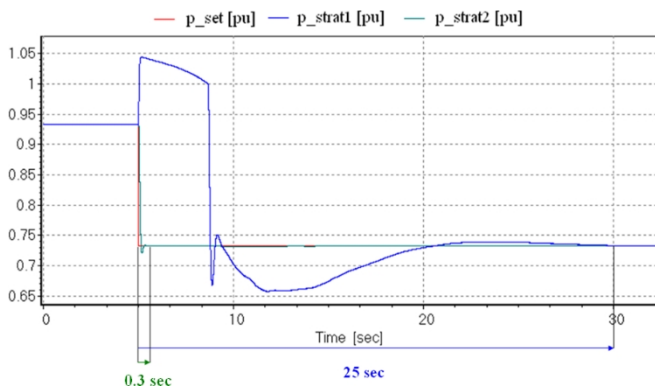


图 27. 图 27 (pu) 中的功率设定点（红色）、策略 1 的功率（蓝色）和策略 2 的功率（绿色）

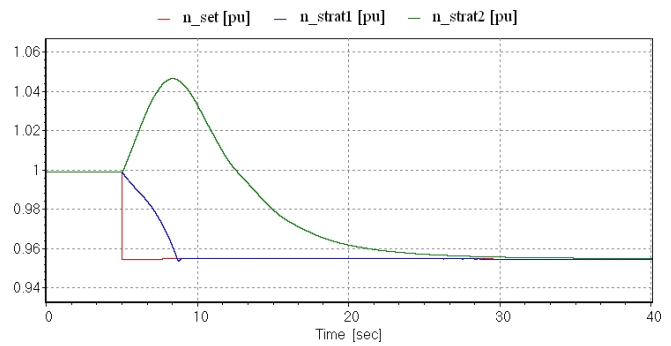


图 28. 速度设定点（红色）、采用策略 1 的速度（蓝色）和采用策略 2 的速度（绿色），单位为 (pu)

我们可以发现，第二种策略的功率设定点变化速度是第一种策略的 84 倍，因此，我们更倾向于采用第二种策略。

VI. 结论

模拟了一个虚构的 2x320 兆瓦变速泵-涡轮发电厂在稳态和瞬态条件下的行为，包括液压、电气和控制系统。比较了发电模式下的两种控制策略，并指出了其动态性能。提出了一种与转子级联有关的伪连续近似方法，并通过与完整模型的比较进行了验证。通过使用这种方法，计算时间大大缩短（系数约为 60）。

鸣谢

作者衷心感谢该项目的合作伙伴--瑞士比尔的 ALSTOM Power Hydro A. Schwery 博士和法国格勒诺布尔的 J.-L. Deniau 先生提供的资金支持和帮助。

参考资料

- [1] R.C. Jaeger, 《水电工程实践中的流体瞬态》，格拉斯哥：布莱基，1977 年。
- [2] C.Nicolet, "Hydroacoustic modelling and numerical simulation of unsteady operation of hydroelectric systems", Thesis EPFL n° 3751, 2007, (<http://library.epfl.ch/theses/?nr=3751>).
- [3] H.M. Paynter, "浪涌和水锤问题". Transaction of ASCE, vol. 146, p 962-1009, 1953.
- [4] A.Sapin, "Logiciel modulaire pour la simulation et l'étude des systèmes d'entraînement et des réseaux électriques", Thesis EPFL n° 1346, 1995, (<http://library.epfl.ch/theses/?nr=1346>).
- [5] O.H. Souza, Jr.; N. Barbieri; A.H.M. Santos, "通过模拟水闸非线性模型和水轮机模型研究水电站的水力瞬态", 《电气和电子工程师学会电力系统论文集》，第 14 卷第 4 期，第 1269 - 1272 页，1999 年。
- [6] E.E. B. Wylie, & V. L. Streeter, "Fluid transients in systems". Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J, 1993.

2008 年国际电机大会论文集

- [7] E.Kopf, S. Brausewetter, "Optimized control strategies for variable speed machines", *22 IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems*, Stockholm, Sweden, June 29-July 2, 2004
- [8] A.Hodder, "配备 3 级 VSI 级联的双馈异步电机发电机", 论文 2939, 瑞士洛桑 EPFL, 2004 年
- [9] J.-J. Simond, A. Sapin, D. Schafer, "Expected benefits of adjustable speed pumped storage in the European network", *Hydropower into the next century*, pp.
- [10] A.Schwery, E. Fass, J. -M.Henry, W. Bach, A. Mirzaian, "Pump Storage Power plants, ALSTOM's long experience and technological innovation", *Hydro 2005*, Villach, Austria, 2005