

| | |
|---------------------|--|
| Zeitschrift: | Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins |
| Herausgeber: | Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke |
| Band: | 63 (1972) |
| Heft: | 20 |
| Artikel: | Simulation sur l'ordinateur analogique d'une installation hydroélectrique en marche isolée sur charge ohmique symétrique |
| Autor: | Birolini, A. / Clément, L. |
| DOI: | https://doi.org/10.5169/seals-915743 |

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 17.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Simulation sur l'ordinateur analogique d'une installation hydroélectrique en marche isolée sur charge ohmique symétrique¹⁾

Par MM. A. Birolini et L. Clément

Ce travail présente une méthode de simulation sur l'ordinateur analogique d'une installation hydroélectrique travaillant en marche isolée sur une charge ohmique symétrique. La simulation est valable dans tout le domaine de charge par le fait qu'elle tient compte des caractéristiques non linéaires les plus importantes des différents éléments du système; cette simulation est élaborée pour une turbine Francis et appliquée à une installation de 30 MW.

D'après les mesures faites par R. Keller [4]²⁾, la vitesse de rotation d'un tel groupe oscille lentement d'une manière permanente lorsqu'une charge ohmique importante est enclenchée. Ces oscillations sont aussi présentes dans la simulation. Le fait de disposer des oscillosogrammes de toutes les grandeurs électriques et mécaniques permet d'analyser le comportement transitoire du groupe lors de l'enclenchement de la charge, de l'améliorer et en même temps de supprimer les oscillations auto-entretenues. L'analyse conduit à l'introduction d'un asservissement, par exemple, fréquence-tension (déjà signalé dans [4]).

621.311.21 : 62-501.72

In dieser Arbeit wird eine Simulationsmethode für eine hydroelektrische Anlage im Inselbetrieb mit Ohmscher, symmetrischer Last auf dem Analogrechner eingeführt. Die Simulation ist in jedem Belastungsgebiet gültig dank der Tatsache, dass sie die wichtigsten nichtlinearen Charakteristiken der verschiedenen Systemelemente berücksichtigt. Die Simulation wird für eine Francis-Turbine ausgearbeitet und auf eine Anlage von 30 MW angewendet.

Nach den Messungen von R. Keller [4]²⁾, schwingt die Drehzahl langsam und ungedämpft um den Nennwert, wenn eine bedeutende Ohmsche Last angeschaltet wird. Solche Schwingungen treten auch in der Simulation auf. Mit Hilfe der Oszillogramme aller elektrischen und mechanischen Größen war es möglich, das transiente Verhalten der Gruppe bei der Lasteinschaltung eingehend zu analysieren und zu verbessern und dabei die selbsterregten Schwingungen zu eliminieren. Die Analyse legt die Einführung einer Frequenz-Spannungs-Rückführung nahe (wie sie schon in [4] angedeutet ist).

1. Introduction

Les résultats des mesures effectuées dans des centrales hydroélectriques, par exemple [4] et [10], indiquent que les conditions de stabilité de la vitesse de rotation d'un groupe hydroélectrique sont très difficiles à réaliser lorsque celui-ci travaille en marche isolée et sur une charge ohmique. La cause principale de ce phénomène a été reconnue par R. Keller dans [4] et elle s'explique ainsi: La puissance dissipée dans une charge purement ohmique est indépendante de la fréquence, de ce fait pour une (résistance de) charge donnée, le régulateur de tension agit, lors d'une variation de la vitesse de rotation, lui aussi comme régulateur de puissance. Si, pour ces conditions de charge, l'on porte le couple moteur de la turbine (pour une ouverture constante des vannes) et le couple résistant de l'alternateur (pour une puissance fournie constante) en fonction de la vitesse de rotation, on constate qu'au point de travail les deux courbes ont une tangente sensiblement commune. Ce fait laisse entrevoir les difficultés de stabilité mentionnées précédemment.

L'étude théorique du comportement et de la stabilité d'un groupe hydroélectrique est complexe et elle est rendue encore plus difficile par le fait que le système n'est pas linéaire. Il est donc naturel que les premières études aient été développées en linéarisant le système autour du point de travail, voir par exemple [5; 6; 7; 8]. En vue de déterminer les paramètres du régulateur de vitesse donnant le comportement optimum du groupe, le sous-système hydraulique a été analysé de manière plus approfondie dans [9; 10; 11; 12; 13].

¹⁾ Cet article résume le travail qui a été fait par les auteurs à l'Institut d'Automatique et d'Electronique industrielle de l'EPF-Zurich, sous la direction de M. le Prof. Dr h. c. E. Gerecke. Le sujet du problème avait été proposé au Prof. Gerecke par M. le Dr M. Cuénod. Nous tenons ici à remercier vivement notre Maître de l'intérêt et du soutien qu'il nous a manifestés pour ce travail qui fut choisi pour représenter les Universités suisses au concours annuel organisé par la section Etudiants de la Région 8 de l'IEEE à Paris où il gagna le 2e prix.

²⁾ Voir la bibliographie à la fin de l'article.

Le but de cet article est de présenter une méthode de simulation qui permet d'approfondir l'étude du comportement et de la stabilité d'un groupe hydroélectrique en marche isolée sur charge ohmique symétrique. L'étude concerne le comportement du groupe lors de l'enclenchement d'une charge ohmique très importante, par conséquent la simulation doit être valable dans tout le domaine de charge et devra donc tenir compte aussi bien des non-linéarités des équations que des plus importantes caractéristiques non-linéaires des éléments. Ces derniers sont:

- la turbine: étudiée à l'aide de son diagramme topographique,
- l'organe tiroir-servomoteur: qui limite la vitesse d'ouverture des vannes,
- le vannage: qui a une ouverture limitée,
- le régulateur de tension.

La simulation a été développée pour le groupe hydroélectrique, avec une turbine Francis, représenté dans la fig. 1. (Les constantes nécessaires pour une solution concrète du problème correspondent à celles d'un groupe de 30 MW avec une chute de 50 m.)

Après avoir établi les équations et les courbes caractéristiques du groupe et les avoir simulées sur un ordinateur analogique PACE, la première partie de l'analyse de la stabilité consiste en une étude du sous-système électrique et du sous-système hydraulique séparé afin de déterminer:

- la valeur des paramètres du régulateur de tension donnant une réponse optimum du sous-système électrique pour une vitesse de rotation constante,
- la valeur des paramètres du régulateur de vitesse et de la surface de la chambre d'équilibre donnant une réponse optimum du sous-système hydraulique pour un couple résistant sur l'arbre constant³⁾.

Les deux sous-systèmes sont ensuite reliés entre eux. Les oscillosogrammes montrent qu'après l'enclenchement de la

³⁾ Nous admettons ici que l'étude du comportement de l'installation a lieu dans la phase de projet. Pour limiter le nombre des paramètres nous admettons que seuls les régulateurs et la chambre d'équilibre aient encore des paramètres libres.

charge ohmique nominale le comportement transitoire du groupe est mauvais et de plus des oscillations auto-entretenues, semblables à celles mesurées par *R. Keller* [4], sont présentes. Comme la simulation donne les oscillogrammes de toutes les grandeurs électriques et mécaniques, on est en mesure d'analyser les causes du mauvais comportement transitoire du groupe et des oscillations afin de les supprimer.

2. Liste des symboles

Sauf pour les constantes, les grandeurs qui ne sont pas réduites sont accompagnées par l'indication (grandeur réelle):

| | | | |
|-----------------|---|------------------------------|---|
| A, B | constantes | t, T | temps, constante de temps (grandeur réelle) |
| f_n | fréquence nominale (grandeur réelle) | u | tension de phase aux bornes de l'alternateur |
| h_0 | hauteur du plan d'eau dans le bassin d'accumulation | u_0 | valeur de consigne de la tension de phase |
| h_t | hauteur représentative de la pression sur la turbine | Δu | écart de la tension de phase ($\Delta u = u_0 - u$) |
| Δh | variation de la hauteur représentative de la pression sur la turbine | u_d, u_q | tension sur l'axe longitudinal et transversal |
| i | courant de phase | u_e | tension d'excitation de l'alternateur |
| i_d, i_q | courant sur l'axe longitudinal et transversal | u_{eP} | tension d'excitation de l'excitatrice principale |
| i_e | courant d'excitation de l'alternateur | u_{eA} | tension de l'excitatrice auxiliaire |
| i_{eP} | courant d'excitation de l'excitatrice principale | v_g, v_c | vitesse de l'eau dans la galerie d'amenée et dans la conduite forcée |
| k_{ft} | coefficient de l'asservissement fréquence-tension | x_d, x_q | réactance synchrone longitudinale et transversale |
| k_g | coefficient de frottement (dans la galerie) | x_d' | réactance transitoire |
| l_1, l | ouverture du vannage: avant et après la limitation | x_d'', x_q'' | réactance subtransitoire longitudinale et transversale |
| m_e | couple résistant électrique (alternateur) | x_d^* | réactance subtransitoire avec l'enroulement d'excitation ouvert |
| m_t | couple moteur (turbine) | Δy | déplacement total du tiroir |
| n | vitesse de rotation $n = \omega/\omega_n$ | Δz | variation du plan d'eau dans la chambre d'équilibre |
| n_0 | valeur de consigne de la vitesse de rotation | α_0 | angle d'ouverture des aubes (grandeur réelle) |
| Δn | écart de la vitesse de rotation ($\Delta n = n_0 - n$) | β_0 | ouverture du vannage (grandeur réelle) |
| N_n, ω_n | vitesse de rotation, vitesse angulaire nominale de la turbine (grandeur réelle) | γ', ρ' | coefficients pour le couple moteur et le frottement |
| P_n | puissance nominale de la turbine (grandeur réelle) | δ_r | valeur du statisme passager du régulateur de vitesse, pour l'ouverture des vannes entre la position de pleine charge et celle de la marche à vide (grandeur réelle) |
| q | débit | δ_{re} | valeur du statisme passager du régulateur de tension, pour le secteur roulant se trouvant entre la position de pleine charge et celle de la marche à vide (grandeur réelle) |
| r | résistance de l'enroulement statorique | $\varepsilon_1, \varepsilon$ | position du secteur roulant avant et après la limitation |
| r_L | charge ohmique | η | rendement de la turbine |
| | | τ | temps ($\tau = 2\pi \cdot f_n t$) |
| | | τ_d' | constante de temps transitoire |
| | | τ_d'', τ_q'' | constante de temps subtransitoire longitudinale et transversale |

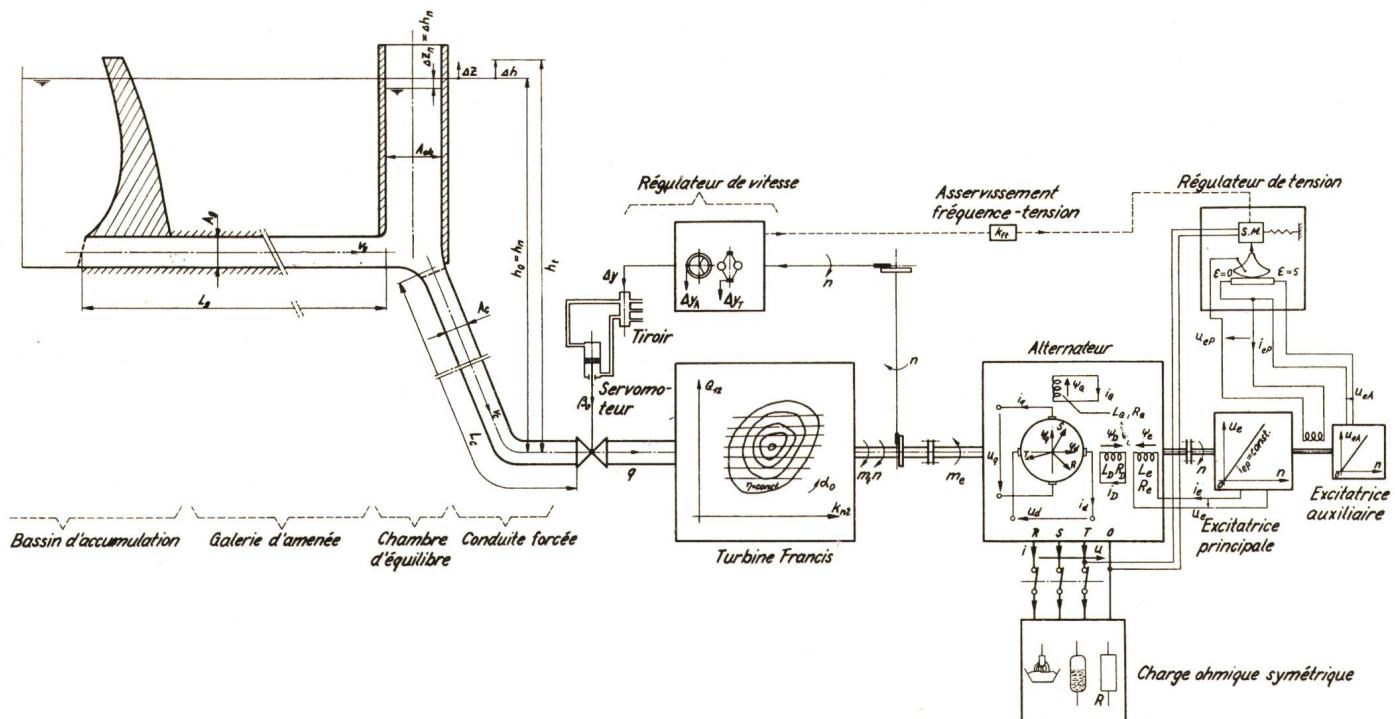


Fig. 1
Groupe hydroélectrique en marche isolée sur une charge ohmique symétrique

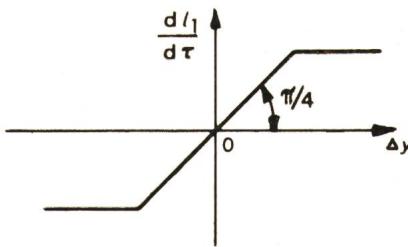


Fig. 2
Vitesse d'ouverture des vannes en fonction du déplacement total du tiroir
Indications voir le texte

| | |
|------------------------------------|---|
| τ_{EP} | constante de temps de l'excitatrice principale |
| $\tau_g, \tau_{\text{eh}}, \tau_c$ | constante de temps de la galerie d'amenée, de la chambre d'équilibre et de la conduite forcée |
| τ_{mec} | constantes de temps des masses tournantes |
| τ_r | constante de temps des asservissements du régulateur de vitesse |
| τ_{re} | constante de temps des asservissements du régulateur de tension |
| ψ_d, ψ_q | flux sur l'axe longitudinal et transversal |
| ψ_D, ψ_Q | flux de l'enroulement amortisseur sur l'axe longitudinal et transversal |
| ψ_e | flux d'excitation de l'alternateur. |

3. Formulation du problème

Afin de donner aux équations un caractère général qui leur permet de décrire n'importe quel groupe hydroélectrique, toutes les variables sont exprimées en grandeurs réduites. Les définitions de ces grandeurs réduites ainsi que la signification des coefficients des équations sont données dans l'appendice.

Pour la formulation du problème, il est nécessaire de séparer le système en différents éléments, de faire sur ceux-ci certaines suppositions et d'établir les équations décrivant leur comportement. Ces différents éléments sont, en se référant à la fig. 1.

3.1 Le sous-système hydraulique jusqu'au vannage

Il comprend :

a) Le bassin d'accumulation dont la hauteur h_0 du plan d'eau est supposée constante. La hauteur équivalente h_t de la pression sur la turbine est :

$$h_t = h_0 + \Delta h^4 \quad (1_H)$$

b) La galerie d'amenée supposée rigide et avec une perte de charge proportionnelle au carré de la vitesse de l'eau. Le théorème de l'impulsion permet de poser :

$$\tau_g \frac{dv_g}{d\tau} + k_g v_g^2 + \Delta z = 0 \quad (2_H)$$

On a négligé d'une part le problème complexe de la distribution de l'énergie au point d'insertion de la chambre d'équilibre et d'autre part le fait que le terme $k_g v_g^2$ peut avoir le signe négatif si l'écoulement de l'eau se fait en direction du bassin, comme par exemple lors des oscillations de l'eau provoquées par le déchargeement brusque de l'alternateur.

c) La chambre d'équilibre supposée cylindrique, rigide et sans frottement. Si l'on exclut la présence d'un asservissement au plan d'eau [5], la surface minimale (pour un comportement stable lors de petites variations du débit) est donnée par la condition de Thoma [7] :

$$A_{\text{ch}} > A_g \cdot \frac{L_g}{K_g \cdot 2g H_0}$$

L'équation de continuité appliquée au point d'insertion de la chambre donne :

$$\tau_{\text{ch}} \frac{d\Delta z}{d\tau} + (v_e - v_g) = 0 \quad (3_H)$$

où τ_{ch} est proportionnel à A_{ch} .

d) La conduite forcée supposée rigide et sans frottement; par conséquent, comme l'élasticité de l'eau est aussi négligée, seul le coup de bâlier en masse est considéré. (Ces suppositions sont valables puisque

⁴⁾ La variation de la pression en aval est négligée, ce qui est valable dans la plupart des cas [6].

dans l'exemple choisi, la conduite forcée est courte. Dans d'autres cas l'élasticité de la conduite forcée et de l'eau devra être considérée, comme indiqué par exemple dans [14; 15].) Le théorème de l'impulsion permet d'écrire :

$$\tau_e \frac{dv_e}{d\tau} + \Delta h - \Delta z = 0 \quad (4_H)$$

3.2 Le régulateur de vitesse

Il comprend :

a) L'organe de mesure astatique (le groupe est en marche isolée) composé d'un tachymètre et d'un accéléromètre; il agit sur le tiroir en donnant le déplacement total :

$$\Delta y = \Delta y_T + \Delta y_A = 0,8 \left(\frac{\Delta n}{\delta_r \tau_r} + \frac{1}{\delta_r} \cdot \frac{d\Delta n}{d\tau} \right) \quad (5_H)$$

b) L'organe de transmission composé du tiroir et du servomoteur. A cause de la construction mécanique du tiroir, la vitesse d'ouverture des vannes en fonction du déplacement du tiroir peut être représentée approximativement par la courbe de la fig. 2.

La vitesse maximum d'ouverture des vannes est :

$$\left| \frac{dI_1}{d\tau} \right|_{\max} = \frac{0,25 \text{ s}^{-1}}{2 \pi f_n}$$

L'ouverture des vannes est donnée par l'équation suivante :

$$I_1 = \int_0^{\tau} \frac{dI_1(x)}{dx} dx \quad (7_H)$$

3.3 La turbine

La turbine choisie est du type Francis. Le couple moteur est donné par :

$$m_t = \frac{h_t q \eta \gamma'}{n} \quad (8_H)$$

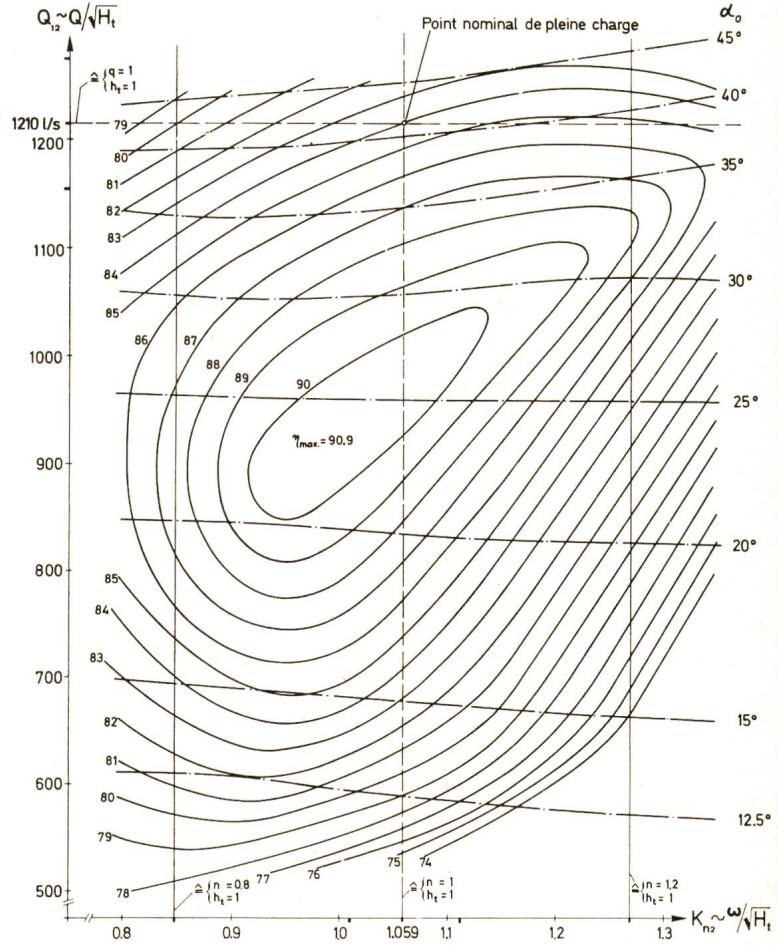


Fig. 3
Diagramme topographique d'une turbine Francis

$(P_n = 30 \text{ MW}, N_n = 214,3 \text{ t/min}, H_n = 50 \text{ m})$

Indications voir le texte

Il est proportionnel au produit du débit q sur la turbine par son rendement η . Comme le régulateur de vitesse ne donne que l'ouverture du vannage l (l_1 avant la limitation), on doit trouver des relations entre l'ouverture l et le débit q , de même qu'entre l et le rendement η ; ces relations sont contenues dans le diagramme topographique. La fig. 3 donne le diagramme topographique et la fig. 4 la courbe de transformation pour le vannage. Ce diagramme et cette courbe nous ont été transmis par un fabricant de turbines. Le diagramme topographique contient les deux familles de courbes suivantes:

- courbes avec rendement η constant;
- courbes avec angle d'ouverture des aubes α_0 constant.

L'abscisse du diagramme est proportionnelle à la vitesse de rotation ω et inversement proportionnelle à la racine carrée de la hauteur représentative de la pression sur la turbine ($1/\sqrt{H_t}$). L'ordonnée est proportionnelle au débit Q et à $1/\sqrt{H_t}$. Au point de travail nominal, le diagramme donne un angle d'ouverture $\alpha_{0n} = 41^\circ$ et la courbe de transformation livre l'ouverture nominale du vannage: $\beta_{0n} = 91\% \triangleq l = 1$. La fig. 4 montre que l'ouverture du vannage est limitée à $l = 1,1$ ($\beta_0 = 100\%$). Par conséquent:

$$l_1 \rightarrow 0 \leq l \leq 1,1 \quad (9_H)$$

Les fig. 5a, b, c, d donnent les deux courbes du débit sur la turbine et les deux courbes du rendement en fonction de l'ouverture du vannage. Ces courbes ont été construites point par point à partir du diagramme topographique en supposant une vitesse de rotation n constante et la chute h_t comme paramètre et vice-versa. Les courbes ont été extrapolées pour $l < 0,4$.

Seules les courbes des fig. 5a et 5d dans lesquelles les paramètres choisis ont une influence, ont été simulées (voir fig. 6). Bien que le diagramme topographique ne soit valable que pour l'état stationnaire, on admet qu'il l'est aussi pour l'état transitoire (à cause du lent déplacement du point de travail de la turbine).

L'équation du mouvement appliquée à l'arbre de la turbine donne, en négligeant le couple résistant des excitatrices:

$$m_t - m_e - \tau_{mee} \frac{dn}{dt} - \rho' n^2 = 0 \quad (10_H)$$

On admet que les pertes par frottement sont proportionnelles au carré de la vitesse de rotation.

3.4 Le régulateur de tension et le système d'excitation

Le régulateur de tension utilisé dans l'exemple traité est un régulateur à secteurs roulants de type R4 dont les caractéristiques nous ont été fournies par le fabricant. La fonction de

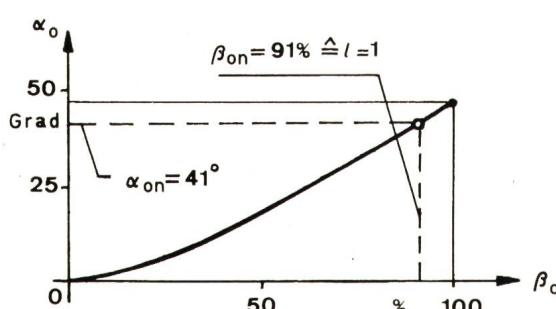


Fig. 4
Courbe de transformation pour le vannage
Indications voir le texte

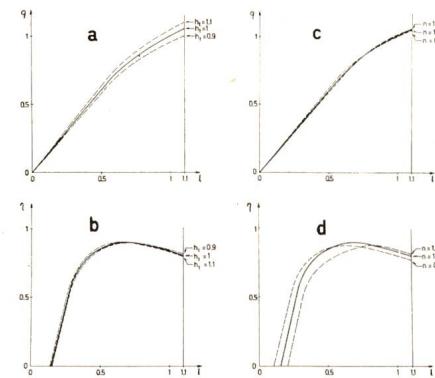


Fig. 5
Débit q et rendement η de la turbine en fonction de l'ouverture du vannage l
a et b avec h_t comme paramètre ($n = 1$)
c et d avec n comme paramètre ($h_t = 1$)
Indications voir le texte

transfert de la variation de la position du secteur roulant en fonction de la variation de la tension est donnée dans [3]. En admettant que cette fonction reste valable dans tout le domaine de travail, on a pour un régulateur astatique (le groupe est en marche isolée):

$$\varepsilon_1 \approx 3 \left(\frac{\Delta u}{\delta_{re}} + \frac{1}{\delta_{re} \tau_{re}} \int_0^{\varepsilon} \Delta u(x) dx \right) \quad (1_E)$$

La course du secteur roulant est limitée entre 0 et la position maximale 5, par conséquent:

$$\varepsilon_1 \rightarrow 0 \leq \varepsilon \leq 5 \quad (2_E)$$

Le système d'excitation comprend une excitatrice principale et une excitatrice auxiliaire, les deux machines sont supposées linéaires, sans réaction d'induit et sans chute de tension inducitive et ohmique dans le rotor. En plus le champ de l'excitatrice auxiliaire est supposé constant. Le courant d'excitation de l'excitatrice principale est donné par:

$$i_{eP} + \tau_{eP} \frac{di_{eP}}{d\tau} = u_{eP}$$

Pour la tension d'excitation de l'excitatrice principale u_{eP} et pour la tension d'excitation de l'alternateur u_e , on peut écrire:

$$\begin{aligned} u_{eP} &= \varepsilon n \\ u_e &= i_{eP} n \end{aligned}$$

par conséquent:

$$\begin{aligned} i_{eP} + \tau_{eP} \frac{di_{eP}}{d\tau} &= \varepsilon n \\ u_e &= n i_{eP} \end{aligned} \quad (3_E)$$

Il y a lieu de noter que pour $n = 1$ et en marche à vide on a fixé $\varepsilon_1 = \varepsilon = u_{eP} = u_e = 1$.

3.5 La machine synchrone (alternateur)

Les 13 équations fondamentales de la machine synchrone supposée non saturée sont données dans *Laible* [1] et *Concordia* [2]. En se référant à [1], on donne dans l'appendice ces équations et les relations entre les coefficients s'y rapportant. Ensuite on exprime les coefficients en fonction des réactances et constantes de temps directement mesurables. Le nombre de variables est réduit en substituant les équations des enroulements amortisseurs et en supprimant celles du système homopolaire (puisque la charge est admise symétrique). Les 7 équations finales sont données dans la fig. 6. (Equations 1_A...7_A.)

3.6 La charge

Elle est admise ohmique et symétrique. Elle peut par conséquent être branchée directement sur l'axe longitudinal et transversal du modèle de l'alternateur. Ainsi la simulation n'emploie pas l'oscillateur commandé et les matrices nécessaires à la transformation des valeurs continues du système d , q en valeurs alternatives triphasées et vice-versa. Les équations de la charge sont:

$$i_d = \frac{u_d}{r_L} \text{ et } i_q = \frac{u_q}{r_L}$$

4. Solution

La fig. 6 donne le schéma fonctionnel de principe du groupe de la fig. 1, il contient les 6 éléments du groupe avec leurs équations et courbes données en grandeurs réduites. La fig. 6

énumère aussi les variables liant les éléments entre eux ainsi que les 4 grandeurs d'entrée et les 3 de sortie du groupe complet.

En substituant les valeurs numériques de l'exemple choisi aux valeurs algébriques (les valeurs numériques sont calculées dans l'appendice) et en ordonnant les équations et les courbes de manière à résoudre le problème, on obtient le schéma fonctionnel du groupe traité en exemple. Ce dernier permet d'établir le schéma pour l'ordinateur analogique et de préparer le programme pour l'ordinateur digital. La simulation a été faite sur l'ordinateur analogique PACE.

Remarques:

a) Les conditions initiales ont été choisies comme suit: pour le sous-système électrique, toutes les variables sont posées égales à zéro; pour le sous-système hydraulique, les conditions initiales sont celles

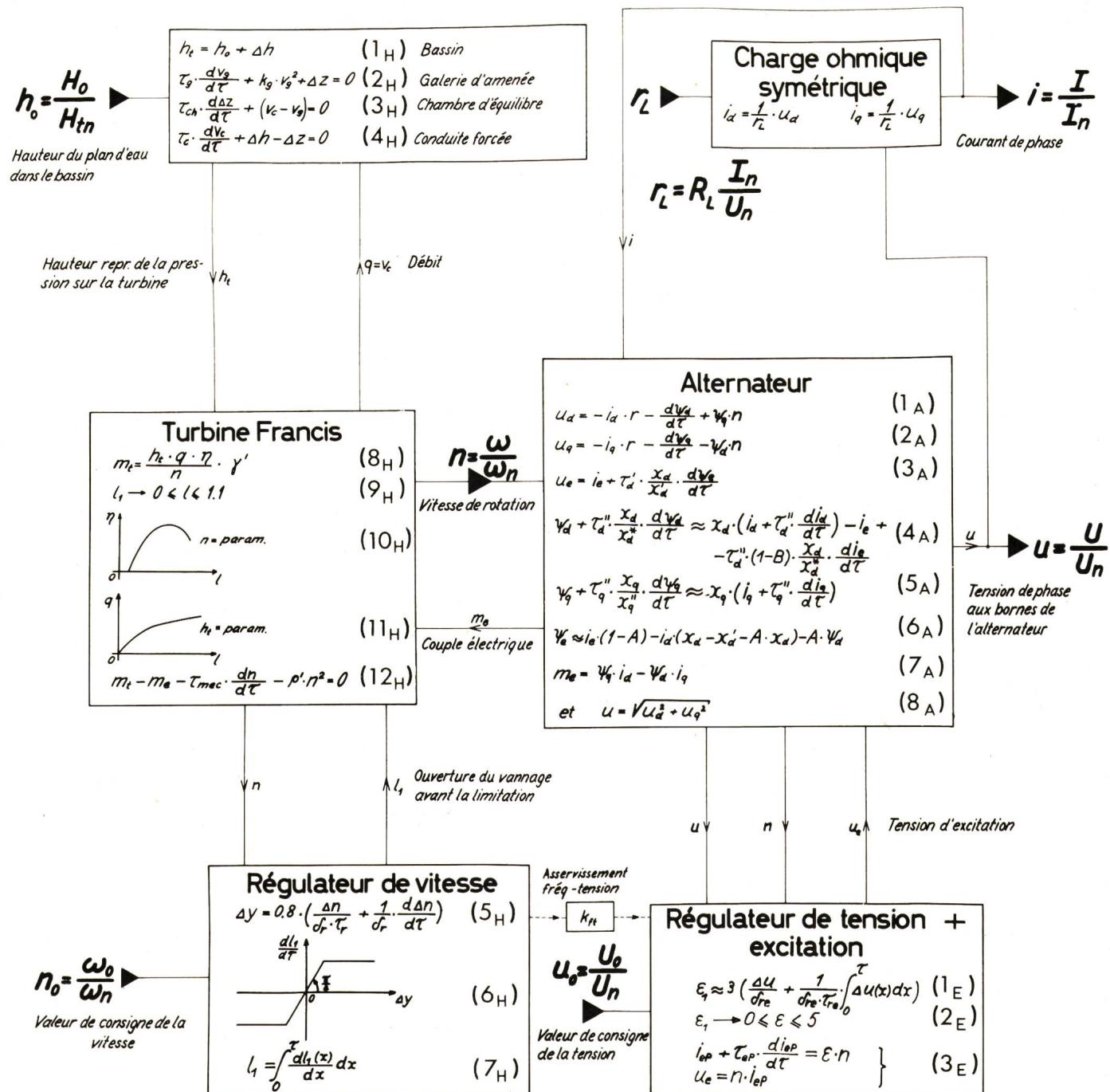


Fig. 6

Schéma fonctionnel de principe du groupe hydroélectrique en marche isolée sur charge ohmique symétrique

Indications voir le texte

Fig. 7
Simulation de la turbine Francis traitée en exemple
(sans l'équation des masses tournantes)
Indications voir le texte

qui correspondent au groupe tournant à vide et à la vitesse de rotation nominale⁵.

b) Les courbes du débit sur la turbine et du rendement de celle-ci en fonction de l'ouverture du vannage (avec h_t , respectivement n comme paramètre) ont été approchées aux courbes réelles de la fig. 5a et 5d de la façon indiquée sur la fig. 7.

5. Résultats

Le système de réglage contient 2 paramètres pour le régulateur de tension (δ_{re} et T_{re}) et deux paramètres pour le régulateur de vitesse (δ_r et T_r)⁶. En plus la constante de temps de la chambre d'équilibre (T_{ch}) doit, dans notre cas, être supérieure à la valeur fixée par la condition de Thoma (voir la note 3 et le paragraphe 3.1).

Dans le but de simplifier la détermination des 5 paramètres donnant un comportement optimum (réaction rapide, oscillations minimales) de l'installation traitée en exemple, on étudie séparément le sous-système électrique et mécanique.

Ensuite on réunit les deux sous-systèmes et on étudie le comportement du groupe entier.

5.1 Sous-système électrique seul

Dans ce cas, la vitesse de rotation est posée constante ($n = 1$). La fig. 8 montre l'influence de δ_{re} et de T_{re} sur la tension u aux bornes de l'alternateur lors de l'enclenchement de la valeur de consigne du régulateur de tension et lors de l'enclenchement et du déclenchement de la charge ohmique nominale.

Une étude du comportement pour différentes charges et valeurs des paramètres permet de déterminer la valeur de ceux-ci donnant un comportement optimum (réaction rapide, oscillations minimales) du sous-système électrique: $\delta_{re} = 0,2$ et $T_{re} = 7,5$ s.

5.2 Sous-système hydraulique seul

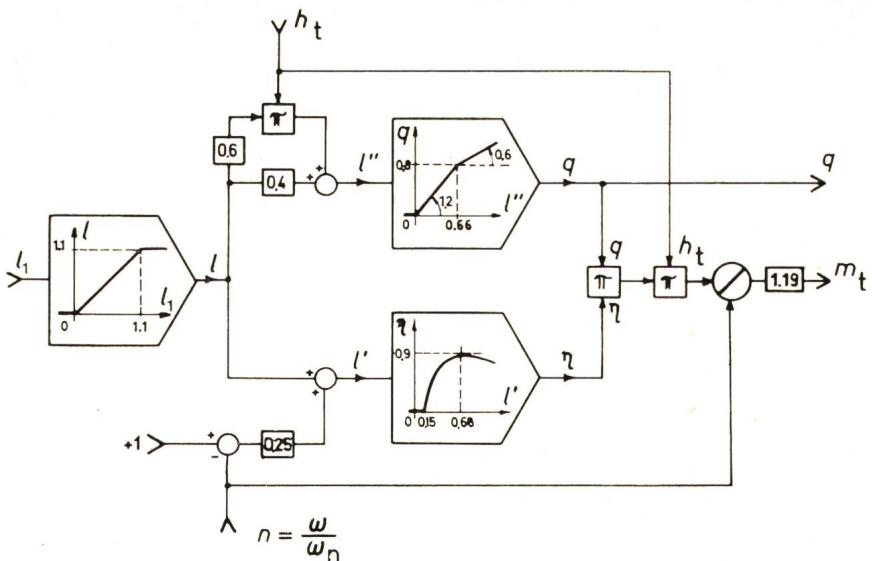
Dans ce cas, le couple résistant électrique est posé constant. La fig. 9 montre l'influence de δ_r et de T_r sur la vitesse de rotation n du groupe lors de l'enclenchement et du déclenchement du couple résistant nominal. Les mesures ont été faites avec une constante de temps de la chambre d'équilibre $T_{ch} = 100$ s (environ deux fois plus grande que la valeur minimale donnée par la condition de Thoma)⁷.

Une étude du comportement pour différents couples résistants et valeurs des paramètres permet de déterminer la valeur de ceux-ci donnant un comportement optimum (réaction rapide, oscillations minimales) du sous-système hydraulique: $\delta_r = 1,6$ et $T_r = 2$ s.

⁵ Le choix pour le sous-système hydraulique est dicté surtout par le fait que le couple moteur (simulé) est obtenu en divisant la puissance par la vitesse de rotation, ainsi que par la présence de l'accéléromètre dans le régulateur de vitesse.

⁶ Il y a lieu de noter que les constantes des régulateurs ne peuvent être ajustées que dans un domaine limité par la construction des régulateurs eux-mêmes. On a remplacé τ_{re} et τ_r par T_{re} et T_r car la simulation est plus pratique en temps réel qu'en réduit. (Notons que l'on a $\frac{d}{dt} \cdot \tau_i = \frac{d}{dt} \cdot T_i$.)

⁷ Pour ces oscillogrammes, ainsi que pour tous ceux qui vont suivre, la hauteur du plan d'eau du bassin est constante et égale à la valeur nominale.



L'influence de la chambre d'équilibre pour ces 2 valeurs des paramètres du régulateur de vitesse est illustrée dans la fig. 10.

La fig. 10 montre que la constante de temps de la chambre d'équilibre $T_{ch} = 100$ s choisie depuis le début de l'étude donne un comportement satisfaisant, par conséquent nous la maintiendrons pour la suite.

Les 5 paramètres du groupe traité en exemple sont définitivement:

$$\delta_{re} = 0,2; T_{re} = 7,5 \text{ s}; \delta_r = 1,6; T_r = 2 \text{ s}; T_{ch} = 100 \text{ s}$$

Tous les oscillogrammes qui suivent ont été enregistrés avec ces valeurs des paramètres.

5.3 Système hydroélectrique complet

Pour la suite de l'étude les sous-systèmes électriques et hydrauliques sont reliés. La fig. 11a montre l'oscillogramme de la tension u aux bornes de l'alternateur, de la position ϵ du secteur roulant du régulateur de tension, du couple résistant électrique m_e , de la vitesse de rotation n du groupe, du débit q sur la turbine et du couple moteur m_t . Ces courbes ont été

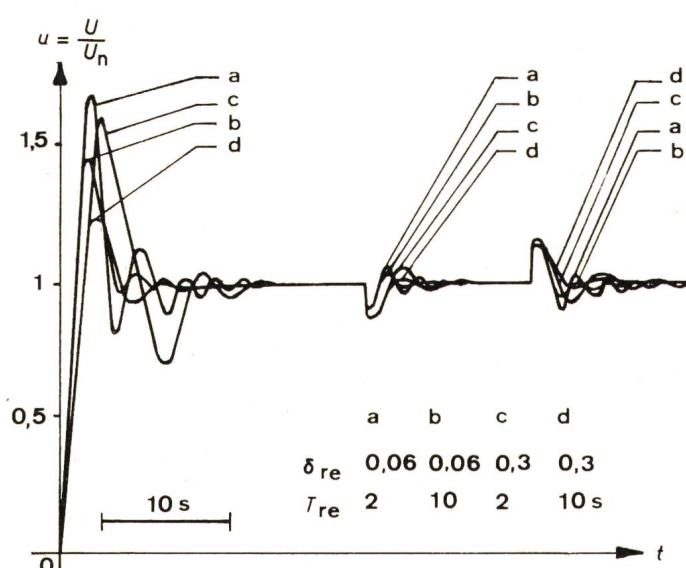


Fig. 8
Influence des constantes δ_{re} et T_{re} du régulateur de tension sur la tension u aux bornes de l'alternateur lors de la mise sous tension, de l'enclenchement et du déclenchement de la charge ohmique nominale

La vitesse de rotation est constante: $n = 1$

Indications voir le texte

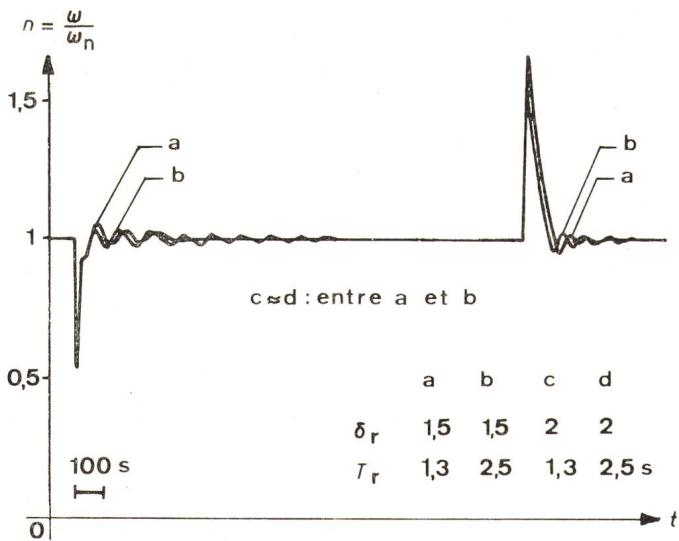


Fig. 9
Influence des constantes δ_r et T_r du régulateur de vitesse sur la vitesse de rotation n lors de l'enclenchement et du déclenchement du couple résistant nominal

Constante de temps de la chambre d'équilibre: $T_{ch} = 100$ s

Indications voir le texte

enregistrées pour l'enclenchement de la valeur de consigne du régulateur de tension, pour l'enclenchement et le déclenchement de la charge ohmique nominale.

Après l'enclenchement de la charge, le régulateur de tension qui est rapide et possède une grande réserve, règle en un temps très court la tension à une valeur proche de la nominale en augmentant considérablement le flux d'excitation (environ 1,4 fois le flux nécessaire) de l'alternateur qui tourne à une vitesse inférieure à la nominale $n \approx 0,7$. Par conséquent le couple résistant électrique augmente aussi au-delà de sa valeur nominale et freine encore plus la turbine. Comme l'ouverture du vannage (distributeur) n'a une réserve de puissance que d'environ 10 % et que pour ce point de travail le rendement de la turbine est un peu plus bas que le rendement au point de travail nominal (voir fig. 5d), l'accélération du groupe est faible et il n'atteint sa vitesse nominale qu'après environ 4 min. Après le phénomène transitoire, la vitesse de rotation du groupe oscille assez fortement avec une période d'environ 90 s et une amplitude non symétrique d'environ 9 %. Le plan de phase de la fig. 12 montre que l'oscillation est auto-entretenue. La tension oscille aussi mais avec une amplitude beaucoup plus petite.

La présence de cette oscillation s'explique ainsi⁸⁾:

a) Les deux courbes du couple moteur et du couple résistant en fonction de la vitesse de rotation ont pour cet état de charge une tangente commune au point de travail (voir le paragraphe 1).

b) Les sous-systèmes électrique, mécanique (turbine et régulateur de vitesse) et hydraulique (jusqu'au vannage) constituent un système oscillant couplé, formé par 3 circuits avec fréquences propres très différentes. Cette différence entre les fréquences propres se laisse reconnaître en observant sur la fig. 11a les oscillogrammes de ε et de q (tout de suite après l'enclenchement de la charge et dans le domaine de l'oscillation auto-entretenue).

c) Lorsque la charge ohmique nominale est enclenchée, la variation de la vitesse de rotation est si grande que le distributeur du vannage s'ouvre au maximum et la limitation de l'ouverture du vannage perturbe l'action du régulateur de vitesse; par contre, pour une charge inférieure à la nominale, par exemple $P = 3/4 P_n$, la limitation de l'ouverture du vannage n'intervient pas et de ce fait l'amplitude de l'oscillation de la vitesse se réduit à moins de 1 %. Pour la charge

⁸⁾ On renonce ici à chercher l'explication détaillée de l'oscillation elle-même, car le but de ce travail est de montrer que l'on peut éliminer cette oscillation et non celui de donner son explication.

ohmique nominale, la non-linéarité constituée par la limitation de l'ouverture du vannage est donc manifestement la responsable de la grande valeur de l'amplitude de l'oscillation auto-entretenue.

R. Keller [4] a mesuré une telle oscillation sur un groupe hydroélectrique installé à l'usine de Rekingen.

Un double problème est à résoudre: réduire la durée des phénomènes transitoires et supprimer l'oscillation auto-entretenue.

On peut dire qu'une liaison directe entre les régulateurs doit être installée. (D'autres asservissemens sont possibles.) Reste à déterminer lequel des régulateurs doit fournir une information à l'autre. Il semblerait que le régulateur rapide, c'est-à-dire le régulateur de tension, devrait obliger l'autre régulateur de travailler plus rapidement. Mais l'oscillogramme du débit de la turbine montre que pendant le phénomène transitoire, le distributeur est complètement ouvert et par conséquent le régulateur de vitesse ne peut plus exercer aucune influence. De plus le système hydraulique commandant l'ouverture du vannage a une vitesse de travail limitée, ce qui est un autre argument contre un asservissement du régulateur de vitesse au régulateur de tension.

L'asservissement du régulateur de tension au régulateur de vitesse a donc été introduit. Un signal proportionnel à l'écart de la vitesse de rotation est employé pour modifier la valeur réglée de la tension. (Le régulateur de tension règle la tension aux bornes de l'alternateur à une valeur plus basse si la vitesse de rotation est inférieure à la valeur de consigne.) Pour une valeur du facteur de proportionnalité égale à 0,2 ($k_{ft} = 0,2$), le phénomène transitoire ne dure qu'environ 60 s, l'amplitude de l'oscillation diminue ($\Delta n_{max} \approx 5 \%$), et la période augmente jusqu'à environ 100 s. Avec $k_{ft} = 0,4$ l'oscillation disparaît.

La fig. 11b montre les mêmes grandeurs que la fig. 11a, mais relevées après l'introduction de l'asservissement fréquence-tension. La vitesse de réglage du groupe est considérablement améliorée et le plan de phase de la fig. 13 montre que l'oscillation disparaît.

Les essais effectuées avec d'autres états de charge ont montré que l'asservissement choisi est efficace sur tout le domaine de charge.

6. Conclusions

Un groupe hydroélectrique composé d'un bassin d'accumulation, d'une galerie d'amenée, d'une chambre d'équilibre, d'une conduite forcée, d'une turbine Francis avec régulateur de

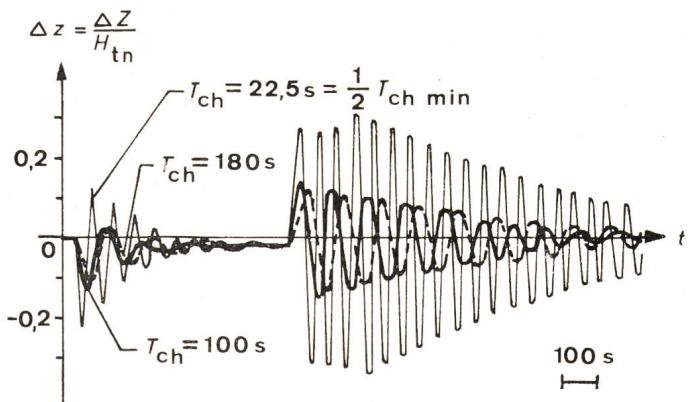


Fig. 10
Influence de la constante de temps de la chambre d'équilibre T_{ch} sur la variation Δz de la hauteur du plan d'eau dans la chambre d'équilibre lors de l'enclenchement et du déclenchement du couple résistant nominal

$\delta_r = 1,6$ et $T_r = 2$ s

Indications voir le texte

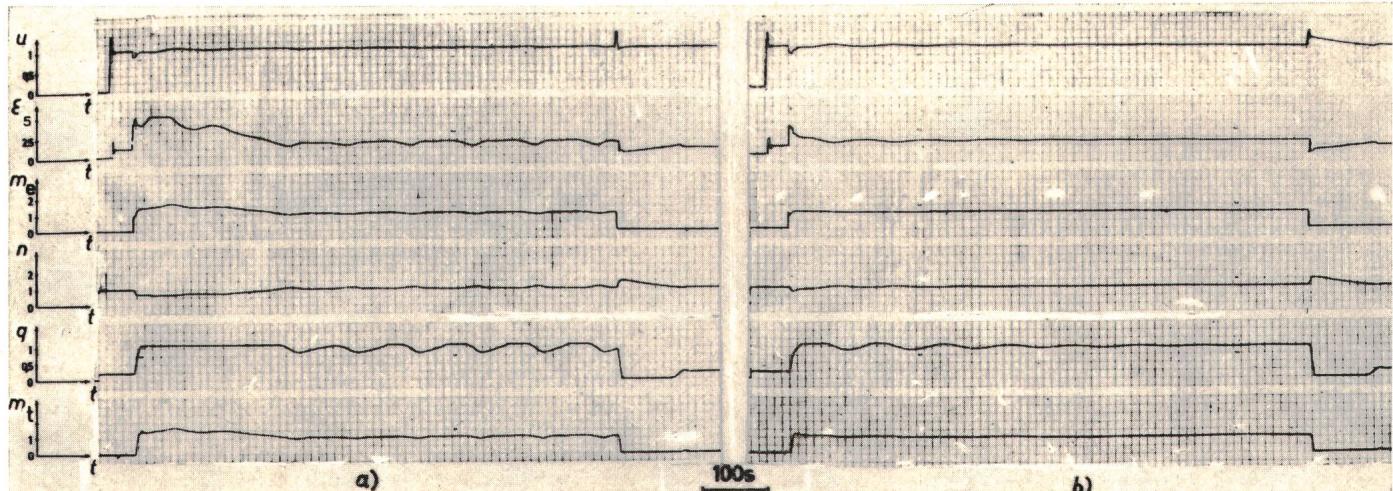


Fig. 11

Oscillogrammes des grandeurs électriques et mécaniques significatives du groupe traité en exemple pour la mise sous tension, l'enclenchement et le déclenchement de la charge ohmique nominale

Constantes $\delta_{re} = 0,2$; $T_{re} = 7,5$ s; $\delta_r = 1,6$; $T_r = 2$ s; $T_{ch} = 100$ s

a avant l'introduction de l'asservissement fréquence-tension

b après l'introduction de l'asservissement fréquence-tension: $k_{ft} = 0,4$

Indications voir le texte

vitesse, d'une machine synchrone avec système d'excitation et régulateur de tension et travaillant en marche isolée sur charge ohmique symétrique est étudié sur un ordinateur analogique PACE. La simulation tient compte en particulier de la non-linéarité des régulateurs de vitesse et de tension et utilise le diagramme topographique entier de la turbine.

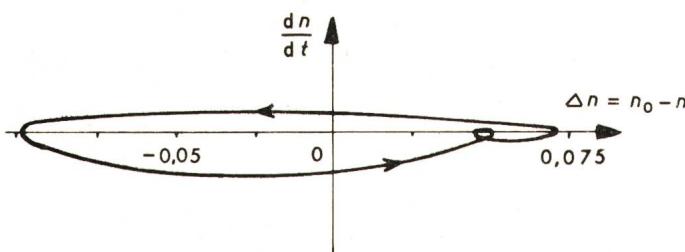


Fig. 12

Plan de phase de la vitesse de rotation du groupe avec charge ohmique nominale

sans aucun asservissement

Indications voir le texte

Toutes les variables électriques et mécaniques peuvent être relevées pour n'importe quelle condition de travail. A titre d'exemple la fig. 14 dans l'appendice 7.5 donne les oscillogrammes des grandeurs électriques et mécaniques du groupe pour l'enclenchement de la valeur de consigne du régulateur de tension, pour l'enclenchement et le déclenchement de la charge ohmique nominale.

Une comparaison entre les mesures faites sur un groupe et celles obtenues à partir de sa simulation permettrait de juger la précision de la méthode présentée dans ce travail.

Cette simulation peut être utilisée pour optimiser les sous-systèmes hydraulique et électrique d'un groupe hydroélectrique, ou pour étudier la nécessité et l'efficacité de certaines adjonctions comme l'asservissement fréquence-tension proposé dans cet exemple, ou encore pour étudier le problème de la séparation de deux circuits de réglage réciproquement influencés⁹⁾.

⁹⁾ Le système comprend en effet 2 grandeurs de consigne avec grandeurs correspondantes (vitesse de rotation et tension), un paramètre (charge), et de plus le sous-système hydraulique agit sur le sous-système électrique et vice-versa.

7. Appendix

7.1 Définition des grandeurs réduites

Une grandeur réduite est définie comme étant le rapport entre la valeur réelle et la valeur nominale correspondante. Elle est donnée dans ce travail en lettre minuscule. Par exemple pour la tension: $u = U/\sqrt{2}U_n$, le courant: $i = I/\sqrt{2}I_n$, le temps: $\tau = \pi f_n t$, le couple: $m = M \omega_n / P_n$, la hauteur représentative de la pression: $h = H/H_{tn}$, la vitesse de rotation: $n = \omega/\omega_n$. Pour la position du secteur roulant du régulateur de tension on a choisi $\varepsilon = 1$ pour $n = 1$ et pour la marche à vide.

7.2 Valeurs numériques de l'installation considérée (voir fig. 1)

– Sous-système hydraulique:

$L_g = 300$ m; $L_e = 65$ m; $N_n = \frac{30}{\pi} \omega_n = 214,3$ t/min; $T_{mec} = 5$ s; $P_n = 30$ MW; $V_{gn} = 3$ m/s; $V_{cn} = 7,2$ m/s; $\eta_n = 0,84$; $H_0 = H_n = 50$ m; $K_g = 0,11$ s²/m; $\gamma = 1000$ kp/m³; $\rho = 5,5$ kpms²; $\delta_r = 0,5 \dots 3$; $T_r = 0,5 \dots 15$ s; $g = 9,81$ m/s².

– Sous-système électrique:

$P_{sn} = 37,5$ MVA; $U_n = 15/\sqrt{3}$ kV; $f_n = 50$ Hz; $\cos \varphi_n = 0,8$; $r = 0,01$; $x_d = 1,2$; $x_q = 0,72$; $x_d' = 0,3$; $x_d'' = x_q'' = 0,2$; $x_d^* = 0,24$; $T_d' = 1$ s; $T_d'' = T_q'' = 0,05$ s; $T_{EP} = 1$ s; $T_{re} = 0,5 \dots 15$ s; $\delta_{re} = 0,1 \dots 0,5$.

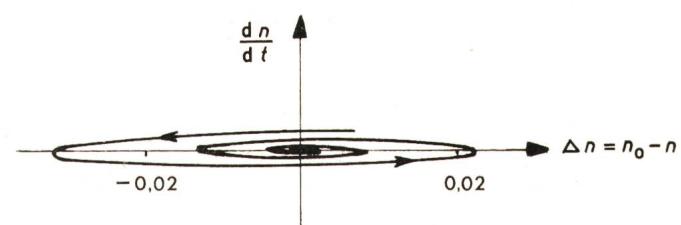


Fig. 13
Plan de phase de la vitesse de rotation du groupe avec charge ohmique nominale après l'introduction de l'asservissement fréquence-tension:

$k_{ft} = 0,4$

Indications voir le texte

7.3 Calcul des coefficients des équations

$$\begin{aligned}
 H_{tn} &= H_0 - K_g V_{gn}^2 & \rightarrow H_{tn} &= 49 \text{ m} \\
 Q_n &= \frac{P_n}{H_{tn} \eta_n \gamma} & \rightarrow Q_n &= 74 \text{ m}^3/\text{s} \\
 A_g &= \frac{Q_n}{V_{gn}} & \rightarrow A_g &= 24,6 \text{ m}^2 \\
 A_e &= \frac{Q_n}{V_{en}} & \rightarrow A_e &= 10,2 \text{ m}^2 \\
 T_g &= \frac{L_g V_{gn}}{g H_{tn}} & \rightarrow T_g &= 1,87 \text{ s}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 T_e &= \frac{L_e V_{en}}{g H_{tn}} & \rightarrow T_e &= 0,97 \text{ s} \\
 T_{ch} &= \frac{A_{ch} H_{tn}}{Q_n}; \text{ cond. de Thoma} & T_{ch} &> 45 \text{ s} \\
 \tau_i &= 2 \pi f_n T_i & \rightarrow \frac{d}{d\tau} \tau_i &= \frac{d}{dt} T_i \\
 k_g &= \frac{V_{gn}^2 K_g}{H_{tn}} & \rightarrow k_g &= 0,02 \\
 \gamma' &= \gamma \frac{H_{tn} Q_n}{P_n} = \frac{1}{\eta_n} & \rightarrow \gamma' &= 1,19
 \end{aligned}$$

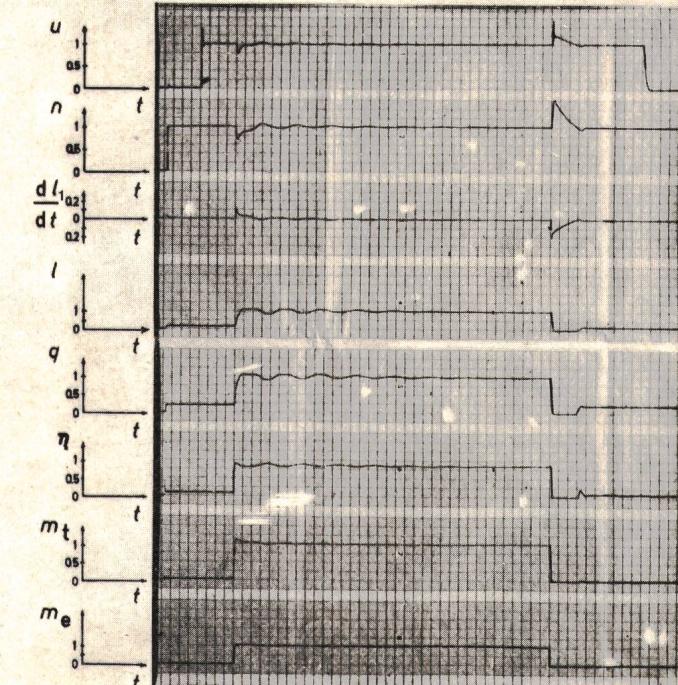
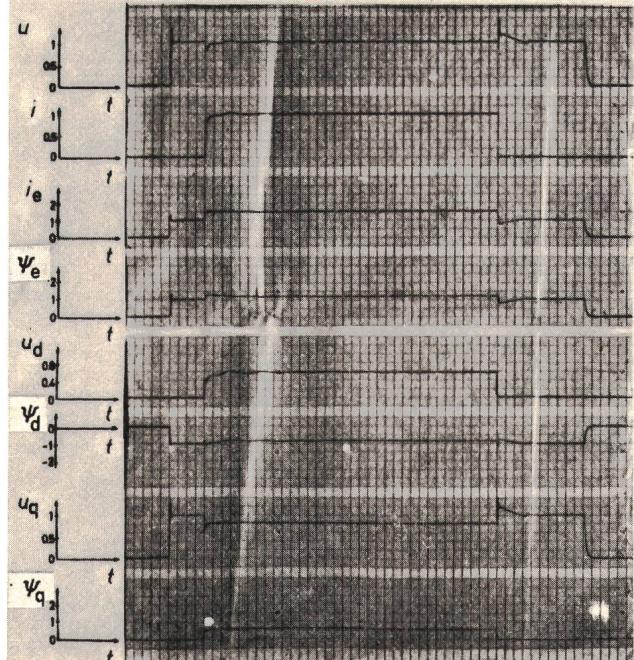
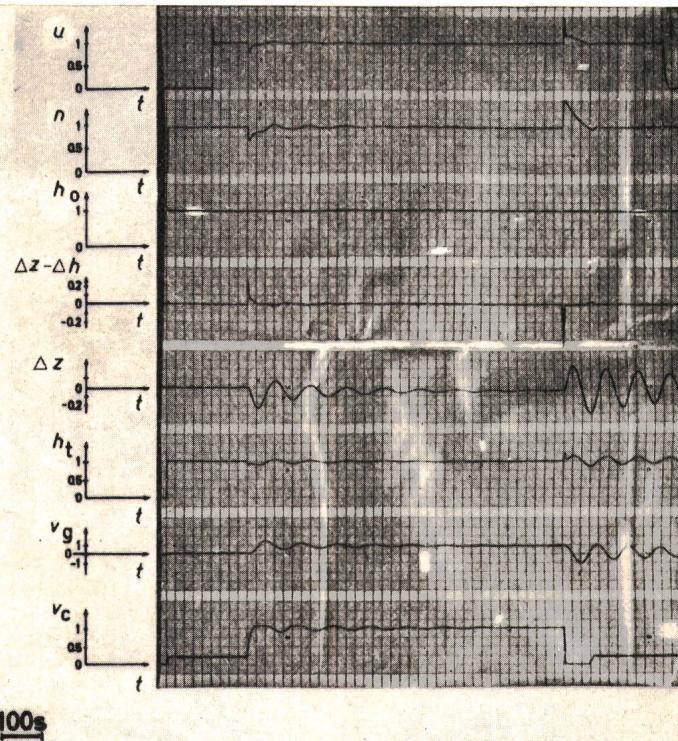
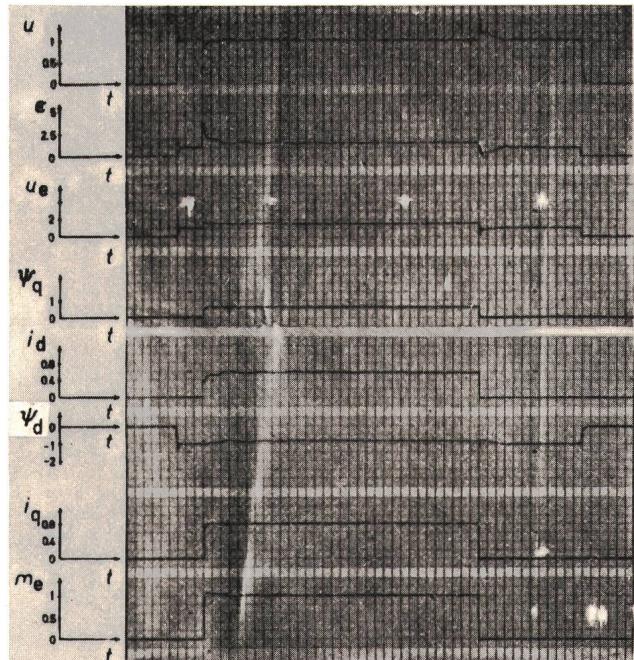


Fig. 14
 Oscillogrammes des grandeurs électriques et mécaniques du groupe traité en exemple pour la mise sous tension,
 l'enclenchement et le déclenchement de la charge ohmique nominale
 Constantes: $\delta_{re} = 0,2$; $T_{re} = 7,5$ s; $\delta_r = 1,6$; $T_r = 2$ s; $T_{ch} = 100$ s; $k_{ft} = 0,4$
 Indications voir le texte

$$\begin{aligned}
 \rho' &= \rho \frac{\omega_n^3}{P_n} & \rightarrow \rho' &= 0,02 \\
 A &= \sqrt{\frac{(x_d - x_d') \cdot (x_d'' x_d - x_d' x_d^*)}{x_d x_d'' (x_d - x_d')}} & \rightarrow A &= 0,81 \\
 B &= \sqrt{\frac{(x_d - x_d^*) \cdot (x_d'' x_d - x_d' x_d^*)}{x_d x_d'' (x_d - x_d')}} & \rightarrow B &= 0,87
 \end{aligned}$$

7.4 Transformation des équations de l'alternateur

Les 13 équations fondamentales de la machine synchrone sont données dans [1]:

$$\begin{aligned}
 u_d &= -i_d r - d\psi_d/dt + \psi_q n \\
 u_q &= -i_q r - d\psi_q/dt - \psi_d n \\
 u_0 &= -i_0 r - d\psi_0/dt \\
 u_e &= i_e + \tau_e d\psi_e/dt \\
 O &= i_D + \tau_D d\psi_D/dt \\
 O &= i_Q + \tau_Q d\psi_Q/dt \\
 \psi_d &= i_d x_d + i_D - i_e \\
 \psi_q &= i_q x_q + i_Q \\
 \psi_0 &= i_0 x_0 \\
 \psi_e &= -i_d x_d (1 - \sigma_{de}) - i_D (1 - \mu_e) + i_e \\
 \psi_D &= i_d x_d (1 - \sigma_{dD}) + i_D - i_e (1 - \mu_D) \\
 \psi_Q &= i_q x_q (1 - \sigma_q) + i_Q \\
 m_e &= \psi_q \cdot i_d - \psi_d \cdot i_q
 \end{aligned}$$

Les relations entre σ et μ sont d'après [1]:

$$\begin{aligned}
 (1 - \mu_e)^2 &= \frac{(1 - \sigma_{de})(1 - \sigma_{eD})}{1 - \sigma_{dD}} \\
 (1 - \mu_D)^2 &= \frac{(1 - \sigma_{dD})(1 - \sigma_{eD})}{1 - \sigma_{de}}
 \end{aligned}$$

Entre les coefficients σ , les constantes de temps τ_e , τ_D , τ_Q et les grandeurs caractéristiques directement mesurables (τ_d' , τ_d'' , τ_q'' , x_d , x_q , x_d' , x_d'' , x_q'' , x_d^*) on a les relations suivantes [1]:

$$\begin{aligned}
 \tau_d' &\approx \tau_e \sigma_{de} & x_q'' &\approx x_q \sigma_q & \tau_d'' &\approx \tau_D \sigma_{dD} \\
 x_d' &\approx x_d \sigma_{de} & x_d^* &\approx x_d \sigma_{dD} & \tau_q'' &\approx \tau_Q \sigma_q \\
 x_d'' &\approx x_d \sigma_{de} \frac{\sigma_{dD}}{\sigma_{eD}}
 \end{aligned}$$

En substituant les σ , les μ et τ_e , τ_D , τ_Q en fonction des grandeurs caractéristiques directement mesurables, en substituant les 4 équations des enroulements amortisseurs et en supprimant

les deux équations du système homopolaire, on obtient les 7 équations (1_A...7_A) données dans le schéma fonctionnel de principe de la fig. 6.

7.5 Oscillogrammes des grandeurs électriques et mécaniques du groupe

La fig. 14 donne les oscillogrammes de toutes les grandeurs électriques et mécaniques du groupe pour l'enclenchement de la valeur de consigne du régulateur de tension, pour l'enclenchement et le déclenchement de la charge ohmique nominale.

Bibliographie

- [1] T. Laible: Die Theorie der Synchronmaschine im nichtstationären Betrieb mit Anwendungsbeispielen und unter Berücksichtigung der modernen amerikanischen Literatur. Berlin/Göttingen/Heidelberg, Springer-Verlag, 1952.
- [2] C. Concordia: Synchronous machines. Theorie and performance. New York, John Wiley and London, Chapman and Hall, 1951.
- [3] H. Bühler: Methoden zur Erregung von Synchronmaschinen. Neue Technik 1(1959)1, S. 33...52, Nr. 2, S. 21...43, Nr. 3, S. 41...62 und Nr. 4, S. 39...55.
- [4] R. Keller: Die Beherrschung der stabilen Drehzahlregulierung bei frequenzunabhängiger Last. Brown Boveri Mitt. 34(1947)6/7, S. 99...104.
- [5] M. Cuénod et A. Gardel: Stabilité de la marche d'une centrale hydroélectrique avec chambre d'équilibre compte tenu des caractéristiques dynamiques du réglage de vitesse. Bull. Techn. Suisse Rom. 78(1952) 15, p. 201...209.
- [6] P. A. Bobillier et M. Cuénod: Stabilité de la marche d'une centrale hydroélectrique avec canal d'aménée, compte tenu des caractéristiques dynamiques de son réglage de vitesse. Automatisme 5(1960)1, p. 3...9 et N° 2, p. 55...58.
- [7] L. Vivier: Turbines hydrauliques et leur régulation. Théorie — construction — utilisation. Paris, Editions Albin Michel, 1966.
- [8] L. Borel: Stabilité de réglage des installations hydroélectriques. Étude théorique et application numérique. Lausanne, Payot et Paris, Dunod, 1960.
- [9] L. M. Hovey: Optimum adjustment of governors in hydro generation stations. Engng. J. (Canada) 43(1960)11, p. 64...71.
- [10] L. M. Hovey et L. A. Bateman: Speed-regulation tests on a hydro station supplying an isolated load. Trans. AIEE Power Apparatus and Systems 81(1962)62, p. 364...371.
- [11] L. M. Hovey: Optimum adjustment of hydro governors on Manitoba Hydro System. Trans. AIEE Power Apparatus and Systems 81(1962) 63, p. 581...587.
- [12] J. M. Undrill et J. L. Woodward: Nonlinear hydro governing model and improved calculation for determining temporary droop. Trans. IEEE PAS 86(1967)4, p. 443...453.
- [13] G. Hutařev: Versuche zur Ermittlung numerischer Werte zur Bestimmung der Regeleigenschaften von hydraulischen Kraftwerken. Neue Technik 5(1963)11, S. 649...670.
- [14] R. Oldenburger et J. Donelson: Dynamic response of a hydroelectric plant. Trans. AIEE Power Apparatus and Systems 81(1962)62, p. 403...419.
- [15] M. Cuénod: Influence des phénomènes de coup de bâlier sur le réglage de la vitesse des turbines hydrauliques. Houille Blanche 4(1949) 2, p. 163...182.

Adresse des auteurs:

A. Birolini, Ing. Dipl. ETH-Z, Institut de Physique Technique de l'ETHZ, Zurich, et R. Clément, Ing. Dipl. ETH-Z, Entreprises Electriques Fribourgeoises, Fribourg.