

Diss. ETH 5858

**Das Betriebsverhalten von Asynchronmaschinen
bei bifrequenter Speisung unter Berücksichtigung
der Stromverdrängung im Rotor**

ABHANDLUNG

zur Erlangung
des Titels eines Doktors der technischen Wissenschaften
der
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE
ZÜRICH

vorgelegt von

ARMIN MEYER
Dipl. El.-Ing. ETH
geboren am 25. Juli 1949
von Rüdlingen SH und Zürich

Angenommen auf Antrag von
Prof. André Dutoit, Referent
Prof. Dr. Hans Werner Lorenzen, Korreferent

Juris Druck + Verlag Zürich
1977

ZUSAMMENFASSUNG

Im ersten Teil der Untersuchungen wird ein Modell der Asynchronmaschine eingeführt, das die für Käfiganker-Asynchronmaschinen wesentliche Stromverdrängung im Rotor-Nutenleiter berücksichtigt. Die abgeleitete Systemgleichungen beschreiben das elektrische und dynamische Verhalten der Asynchronmaschine vollständig.

Der stationäre einfrequente Betrieb der Maschine ist durch die Einführung einer charakteristischen Matrix der Asynchronmaschine besonders einfach zu untersuchen. Es resultieren die Stromortskurven und die Drehmoment-Schlupfkennlinien mit und ohne Berücksichtigung der Stromverdrängung.

Die charakteristische Matrix erlaubt eine übersichtliche Darstellung der analytischen Berechnung des bifrequenten Laufes der Asynchronmaschine.

Der quasistationäre Zustand der Maschine bei bifrequenter Speisung durch zwei in Serie geschaltete Spannungsnetze - die Maschine wird mehrfrequenten Pendelungen um einen stationären Betriebspunkt unterworfen - wird durch ein System von stationären Grössen für die Ströme und die Drehzahl und ein System von entsprechenden Abweichungen beschrieben. Die Bestimmungsgleichungen der stationären Grössen wie die Differentialgleichungen der Abweichungen werden im zweiten Teil hergeleitet. Durch Ansätze der Abweichungen als unendliche trigonometrische Reihen entsprechend dem Charakter der Störfunktion werden die Differentialgleichungen gelöst. Infolge der Abhängigkeit des Gleichungssystems der Abweichungen von demjenigen der stationären Grössen wird ein Integrationsverfahren notwendig, das die simultane Lösung der Systeme erlaubt.

Numerisch wird am Beispiel einer 2400 kW Hochstab-Käfigankermaschine der Einfluss der Frequenz und der Spannung des Zusatzgenerators auf den bifrequenten Lauf der Maschine untersucht.

Im dritten Teil wird der bifrequente Erwärmungslauf mit Nennstrom und Nennspannung am Stator des Prüflings numerisch simuliert. Die Uebereinstimmung mit den experimentellen Untersuchungen ist sehr gut.

Die als Funktion der Frequenz des Zusatzgenerators aus den numerischen Berechnungen resultierenden Ströme, Spannungen, Leistungspendelungen, Luftspalt-Drehmomente, Drehzahlpendelungen und Verluste beschreiben den bifrequenten

Erwärmungslauf vollständig. Insbesondere kann die elektrische Beanspruchung der Speisernetze, die elektrische und mechanische Beanspruchung des Prüflings und die Güte der Nachbildung der Nennverlustaufteilung durch die bifrequente Speisung angegeben werden.

RESUME

Dans la première partie des recherches, on introduit un modèle de la machine asynchrone tenant compte de l'effet pelliculaire dans les conducteurs d'encoche rotoriques, important pour les machines asynchrones à cage d'écureuil. Les équations obtenues décrivent complètement le comportement électrique et dynamique de la machine asynchrone.

Le fonctionnement stationnaire à fréquence unique de la machine devient particulièrement simple à étudier grâce à l'introduction d'une matrice caractéristique de la machine asynchrone. Il en résulte les lieux géométriques du courant et les caractéristiques couple-glisserment avec et sans prise en considération de l'effet pelliculaire.

La matrice caractéristique permet une représentation claire du calcul analytique pour la marche à deux fréquences de la machine asynchrone.

L'état quasi stationnaire de la machine alimentée à deux fréquences par deux réseaux de tension couplés en série - la machine est soumise à des oscillations de plusieurs fréquences autour d'un point de fonctionnement stationnaire - est décrit par un système de grandeurs stationnaires pour les courants et la vitesse de rotation et un système d'écart correspondants. Les équations de détermination des grandeurs stationnaires, de même que les équations différentielles des écarts, sont établies dans la deuxième partie. Les équations différentielles sont résolues par le développement des écarts en séries trigonométriques infinies correspondant au caractère de la fonction perturbatrice. Comme le système d'équations des écarts est dépendant du système des équations des grandeurs stationnaires, on a besoin d'une méthode d'intégration permettant la résolution simultanée des systèmes.

En prenant comme exemple une machine à cage d'écureuil à barres hautes de 2400 kW, l'influence de la fréquence et de la tension de l'alternateur auxiliaire sur la marche à deux fréquences de la machine est étudiée numériquement.

Dans la troisième partie, l'allure de l'échauffement à deux fréquences, avec courant et tension nominaux du stator de la machine essayée, est simulée numériquement. L'accord avec les résultats expérimentaux est très bon.

Les courants, tensions, oscillations de puissance, couples d'entrefer, oscillations de vitesse et pertes, résultant du calcul numérique sous forme de fonction de la fréquence de l'alternateur auxiliaire, décrivent complètement la marche de la machine à deux fréquences. En particulier, la contrainte électrique des réseaux d'alimentation, la contrainte électrique et mécanique de la machine essayée et la qualité de la simulation de la répartition des pertes nominales peuvent être indiquées par l'alimentation à deux fréquences.

SUMMARY

In the first part of the investigation a model is introduced for the asynchronous machine, which takes into account the skin effect in the conductors of the rotor slots so important for squirrel-cage motors. The derived system of equations describes fully the electrical and dynamic response of the asynchronous machine.

The steady-state single-frequency operation of the machine becomes particularly easy to investigate with the introduction of the characteristic matrix of the asynchronous machine. It yields the loci of the current and the torque/slip characteristics, with and without taking the skin effect into account.

The characteristic matrix allows the analytical calculation of the bi-frequency operation of the machine to be presented in a clear form.

The quasi-steady state of the machine when supplied at two frequencies by two voltage system in series - subjecting the machine to multi-frequency oscillation about a stationary working point - is described by a system of steady-state quantities for the current and the speed, and a system of corresponding deviations. The equations which determine the steady-state quantities and the

differential equations for the deviations are derived in the second part. By employing formulae for the deviations comprising infinite trigonometrical series corresponding to the character of the disturbance function, the differential equations are solved. Owing to the system of equations for the deviations being dependent on that of the steady-state quantities, a method of integration is required which permits the simultaneous solution of the system.

The problem is examined numerically, considering as example a 2400 kW deep-slot squirrel-cage motor, determining the influence of the frequency and voltage of the supplementary generator on the bi-frequency operation of the machine.

In the third part the heat run at two frequencies with rated voltage and rated current at the stator of the specimen is simulated numerically. The agreement of the results with the experimental results is remarkably good.

The currents, voltage, load swings, air-gap torques, speed fluctuations and losses resulting from the numerical calculation as a function of the frequency of the supplementary generator fully describe the heat run at two frequencies. In particular the electrical stresses imposed on the supply system, the electrical and mechanical stresses imposed on the specimen and the quality with which nominal loss distribution is simulated by supplying the motor at two frequencies, are stated.