Diss. ETH Nr. 7430

BEITRAG ZU DEN GRUNDLAGEN ROTIERENDER PHYSIKALISCHER SYSTEME

ABHANDLUNG

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

vorgelegt von
LORENZ KLEINER
Dipl. El.- Ing. ETH
geboren am 18. November 1945
von Maschwanden ZH und Zürich

Angenommen auf Antrag von
Prof. A. Dutoit, Referent
Prof. Dr. K. Reichert, Korreferent

ADAG Administration & Druck AG

Zürich 1984

ZUSAMMENFASSUNG

Zur Untersuchung der Grundlagen von (im Querschnitt) zweidimensionalen rotierenden physikalischen Systemen erwies es sich als zweckmässig, anstelle von Vektoren des viel einfacheren Formalismusses wegen komplexe Zeiger zu verwenden. Es erlaubt dies nämlich, die bei rotierenden elektrischen Maschinen üblichen komplexen Zeiger (=Raumzeiger) und damit die Theorie dieser Raumzeiger auf weitere "zweidimensionale" Drehstromsysteme zu erweitern; zudem erlaubt es die "räumliche" Verwendung von Zeigern, diese Raumzeigertheorie auch auf "zweidimensionale" rotierende mechanische Systeme zu übertragen; hieraus ergibt sich aber eine zusätzliche mathematische Verallgemeinerung der Raumzeigertheorie.

Dies ermöglicht:

a) in einem I. Teil, die mathematische Regel zur Aenderung komplexer Differentialgleichungen beim Uebergang von einem rotierenden Koordinatensystem ins andere zu ermitteln [Differentialgleichungs-Uebergangs-Regel: (27)$\Rightarrow$(30)], sowie hieraus elektrische und mechanische Anwendungsbeispiele abzuleiten; und

b) in einem II. Teil, zusammen mit a) und einer feineren Geschwindigkeits-Definition im Anhang, aufgrund der formalen Gleichheit "elektrischer" und "mechanischer" Raumzeiger, zweidimensionale rotierende elektrische und zweidimensionale rotierende mechanische Systeme in direkter Analogie einander gegenüberzustellen.

Nach dieser mehr generellen Uebersicht nun etwas detaillierter zum eigentlichen Inhalt dieser Arbeit:

I. Teil: In diesem I. Teil wird zuerst die Gesetzmässigkeit bzw. die Regel abgeleitet, nach welcher beim Wechsel vom ruhenden ins rotierende Koordinatensystem eine komplexe Differentialgleichung mit konstanten Koeffizienten (Raumzeiger-Differentialgleichung) in eine andere komplexe Differentialgleichung (Raumzeiger-Differentialgleichung) übergeht [Differentialgleichungs-Uebergangs-Regel (27)$\Rightarrow$(30)]. Diese Regel sodann angewendet auf einen zweidimensionalen (=zweiphasigen) Widerstand in Serie zu einer zweidimensionalen (=zweiphasigen) Induktivität (komplexes Induktionsgesetz), d.h. auf R¦L, liefert gerade die bei elektrischen Maschinen so bekannte Park'sche Gleichung, sodass diese Park'sche Gleichung als Spezialfall der Differentialgleichungs-Uebergangs-Regel (27)$\rightarrow$(30) erscheint; dito Anwendung dieser Regel auf eine zweidimensionale Hemmung parallel einer Masse, H//m, liefert das Newton-Gesetz (den komplexen Impulssatz) im rotierenden Koordinatensystem, und dito lässt sich diese Uebergangs-Regel auf einen Drehstrom-Leitwert parallel eines Drehstromkonden-

sators, $G /\!/ C$, sowie auf eine zweidimensionale Hemmung Serie einer zweidimensionalen Feder, $H \,|\, \alpha$, anwenden, sodass zur Park'schen Gleichung drei zusätzliche, zu ihr völlig analoge, Grundgleichungen entstehen (Tafel II S.41). Weitere Anwendung der Uebergangs-Regel auf die Leitungs- und Telegrafengleichung liefert die Raumzeiger-Leitungs- und Telegrafen-Differentialgleichung im relativ zu einer symmetrischen Drehstromleitung rotierenden Koordinatensystem; und weitere, mehrfache dito Anwendung dieser Regel auf die komplex geschriebene Gleichung eines stillstehenden Balkens liefert die dynamische mechanische Raumzeiger-Differentialgleichung einer rotierenden Rotorwelle im relativ zu dieser Welle ebenfalls rotierenden Koordinatensystem.

Hierbei geht es jedoch weniger um das Aufstellen neuer Gleichungen (teilweise sind sie längst bekannt), sondern vielmehr darum, an Beispielen aufzuzeigen, mit welcher Leichtigkeit jedermann anhand dieser Differentialgleichungs-Uebergangs-Regel (27)→(30) grundlegend neue Gleichungen auffinden kann, und dies für beliebige, im Querschnitt zweidimensionale, relativ zu Koordinaten rotierende physikalische Systeme.

<u>II. Teil:</u> Zusammen mit dieser Regel und aufgrund einer feineren Betrachtungsweise verschiedener, in der Ebene zweidimensionaler, Geschwindigkeits-Typen (vgl. Anhang) und deren Spannungs-Analogon, gestattet es die formale Gleichheit des "elektrischen" und des "mechanischen" Raumzeigers, rotierende "zweidimensionale" (= 2- oder 3-phasige) <u>elektrische</u> Systeme und dazu passende (im Querschnitt) zweidimensionale rotierende <u>mechanische</u> Systeme in direkte Analogie zueinander zu stellen:

1) Lavalwelle ←→ Synchronmaschine: So zeigt sich beispielsweise, dass der von einer mechanischen Rotorwelle, die in einer Synchronmaschine drin rotiert, gebildete Lavalwellen-Ersatz zum elektrischen Teil eben dieser Synchronmaschine gerade das mechanische Analogon darstellt. Aufgrund dieser Analogie lassen sich von der Synchronmaschine die Verhältnisse bei reiner Induktivitäts- und Kapazitäts-Last, das Potierdiagramm, die Pascalschnecken, die V-Kurven samt dessen Stabilitätslinien am Lavalwellen-Ersatz, d.h. anhand von Strecken und Federn, sehr gut physikalisch anschaulich darstellen. Betrachtet man andererseits an der Lavalwelle ihre innere Dämpfung (mechanische Materialdämpfung), so müsste sich diese am Lavalwellen-Analogon, nämlich eben an der elektrischen Synchronmaschine, als innere elektrische Dämpfung erweisen, und sie erweist sich dort tatsächlich als zusätzliche elektrische Polrad-Dämpferwicklung.

2) Asynchronmaschine ←→ und ihr mechanisches Analogmodell: Anhand der Uebertragung der "elektrischen" Raumzeigertheorie aufs Mechanische, anhand der Differentialgleichungs-Uebergangs-Regel (27)→(30) sowie anhand der Uebertragung von Methoden aus

der elektrischen Netzwerktheorie (wie z.B. Ersatzschaltungen, Netzwerksynthese-Methode von Cauer) aufs zweidimensional Mechanische lässt sich dito auch für die Asynchronmaschine ihr zugehöriges mechanisches Analogmodell aufstellen. An diesem Analogmodell lassen sich sodann stationäre wie transiente Bewegungen von Belägen innerhalb der Asynchronmaschine physikalisch anschaulich direkt sichtbar machen: Gezeigt wird dies hier anhand zweier Beispiele, nämlich stationär anhand der Entstehung eines Ossannakreises, und transient anhand einer dreiphasig symmetrischen Abschaltung. Wegen dieser Veranschaulichungs-Möglichkeit von Belägen lässt sich zudem dieses Analogmodell bei einer allfälligen technischen Realisierung verwenden als Asynchronmaschinen-Vorlesungs-Demonstrations-Modell.

Worin nun aber liegt der Sinn all dieser hier in ihrer Systematisierung doch recht weit getriebenen Analogie-Betrachtungen, und wie sind diese zu werten in einem grösseren (historischen) Zusammenhang?

Der engere Sinn dieser hoch-systematisierten Analogien liegt im konkreten Forschungs-Vorgehen: So wie ein Bergsteiger, sich abwechselnd mal auf den linken Fuss abstützend (dabei den rechten Fuss nachziehend), dann auf den rechten Fuss abstützend (dabei den linken Fuss nachziehend) eine Felswand hochsteigt, so ähnlich wurden auch die physikalisch anschaulichen Interpretationen von Kapitel 3 & 4 aufgefunden; nämlich, indem man abwechslungsweise z.B. mal auf der elektrischen Seite voranschritt (dabei exakt dessen mechanisches Analogon nachführend), um sodann, beim ersten Auftauchen von anschaulichen Interpretations-Schwierigkeiten, auf die mechanische Seite hinüberzuwechseln und dort weiterzufahren (dabei exakt das elektrische Analogon nachführend), um gegebenenfalls wiederum hinüberzuwechseln ... , usw., hin und her.

Ueber den weiteren Sinn, d.h. über einen grösseren (historischen) Zusammenhang Aufschluss liefert hingegen die Wissenschaftstheorie, insbesondere die Theorie der Wissenschafts-Geschichte [welche Gesetzmässigkeiten in der Wissenschafts-Evolution zu ergründen sucht]. Diese Theorie nämlich lehrt, dass die Entstehung neuer Theorien bzw. neuer Wissens-Gebiete sehr oft eingeleitet wird durch Analogie-Betrachtungen; dies deshalb, weil das menschliche Gehirn eines ein neues Gebiet entwickelnden Forschers ihm eben nicht so viele neue Ideen zu liefern vermag, wie für eine Theorie-Neuentwicklung notwendig wären, sodass sich der Forscher, insbesondere derjenige in der "revolutionären" Forschung, gezwungen sieht, anhand von Analogien Ideen aus bekannten Gebieten auf neue Gebiete zu übertragen.

Genau für dieses Vorgehen der Ideen-Uebertragung, insbesondere für den Entwicklungs-Beginn von im Mechanischen wie im Elektrischen gemeinsamen mathematischen Methoden an physikalischen rotierenden Systemen, soll nun diese Arbeit wichtige neue Impulse leisten.

SUMMARY

The objective of this treatise is to generalize, inter alia, the space vector theory commonly used in the field of electrical machines, with a view to covering further electric three-phase systems, as well as (in the cross-section two-dimensional) mechanical rotating systems.

Part One

- For this purpose, the first part deals with establishing the mathematical rule, according to which complex differential equations (space vector differential equations) are alterating upon changeover from a steady into a rotating coordinate system.
- It is subsequently shown how new, general fundamental equations can be derived from this rule and this for any, in the cross-section two-dimensional, physical system which rotates in relation to Cartesian coordinates. Examples for this are the following:
  + Electrical n-winding machines (Park's general equation)
  + Symmetrical three-phase lines ($\Rightarrow$ space vector line and telegraph equation in the rotating coordinate system, "space vector travelling wave")
  + Mechanical rotor shaft (rotor dynamics)
  + Derivation of a mechanical replacement for synchronous machines.

Part Two

- According to the definition of a table with electrical and mechanical space vector signals, being analog to each other also in rotating coordinates, it is possible to obtain analogy for such electric and mechanical systems which also rotate in relation to the coordinates.
- For example, an analog mechanical model is set up for the synchronous machine (incidentally this is the Laval shaft replacement for the mechanical rotor shaft of this synchronous machine), as well as an analog mechanical model for the asynchronous machine (ASM) (which, depending on its possible technical realization, would lend itself as ASM demonstration model for lectures).
- The analogies of these two mechanical models not only permit physical phenomena inside synchronous and asynchronous machines to be interpreted more intrinsically. At the same time they also supply the point of departure for creating the same common mathematical methods for electric and mechanical rotating systems.