



EIT

FAKULTÄT FÜR
ELEKTROTECHNIK UND
INFORMATIONSTECHNIK



UNTERNEHMEN
REGION

- Fachforum Fluss-Strom 2018 - Komponentenentwicklungen für Fluss-Strom-Wasserkraftanlagen

T. Schallschmidt, M. Stamann, R. Leidhold

Institut für Elektrische Energiesysteme (IESY)

27. September 2018, Magdeburg



- 1 Motivation - Zielstellung
- 2 Transversalflussmaschine
- 3 Konstruktionsansätze/Prototypen
- 4 Experimentelle Untersuchungen
- 5 Zusammenfassung und Ausblick



Komponenten für Fluss-Strom-Anlagen

Steuerung/Regelung

- Netzeinspeisung
- Inselnetz
- Maschinenregelung
- Fernwartung

Lagertechnik

- wartungsfrei
- Gleitlager
- neue Materialkombinationen

Generatoren

- GLW
- TFG

Komponenten für Fluss-Strom-Anlagen

Steuerung/Regelung

- Netzeinspeisung
- Inselnetz
- Maschinenregelung
- Fernwartung

Lagertechnik

- wartungsfrei
- Gleitlager
- neue Materialkombinationen

Generatoren

- GLW
- TFG

Komponenten für Fluss-Strom-Anlagen

Steuerung/Regelung

- Netzeinspeisung
- Inselnetz
- Maschinenregelung
- Fernwartung

Lagertechnik

- wartungsfrei
- Gleitlager
- neue Materialkombinationen

Generatoren

- GLW
- **TFG**

Komponenten für Fluss-Strom-Anlagen

Steuerung/Regelung

- Netzeinspeisung
- Inselnetz
- Maschinenregelung
- Fernwartung

Lagertechnik

- wartungsfrei
- Gleitlager
- neue Materialkombinationen

Generatoren

- GLW

Transversalflussgenerator

Anforderungen an die Generatortechnik

- geringe Drehzahl und hohes Drehmoment
- schwimmende Anlage → Lastverteilung
- geringe dynamische Anforderungen
- Maximierung der Energieausbeute/-ernte → Flottille und MPPT
- Minimierung der Anschaffungs- bzw. Anlagenkosten (Stromgestehungskosten)
- geringe Verluste → maximaler Wirkungsgrad (passive Kühlung)
- Skalierbarkeit der Leistung → Variation der elektrischen Stranganzahl
- Inselnetzfähigkeit

untersuchter favorisierter Lösungsansatz

mehrsträngige permanenterregte Transversalflussmaschine als Direktantrieb

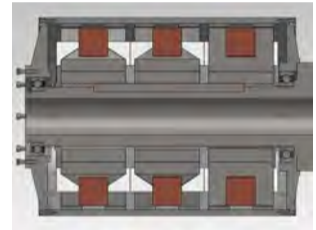
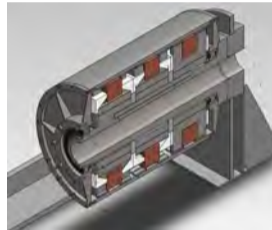
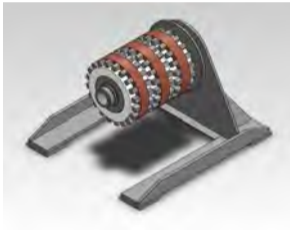
Anforderungen an die Generatortechnik

- geringe Drehzahl und hohes Drehmoment
- schwimmende Anlage → Lastverteilung
- geringe dynamische Anforderungen
- Maximierung der Energieausbeute/-ernte → Flottille und MPPT
- Minimierung der Anschaffungs- bzw. Anlagenkosten (Stromgestehungskosten)
- geringe Verluste → maximaler Wirkungsgrad (passive Kühlung)
- Skalierbarkeit der Leistung → Variation der elektrischen Stranganzahl
- Inselnetzfähigkeit

untersuchter favorisierter Lösungsansatz

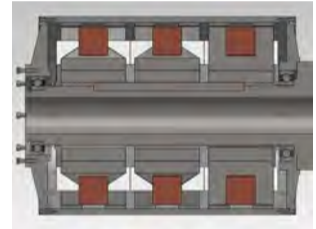
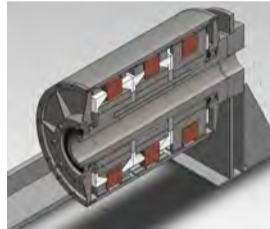
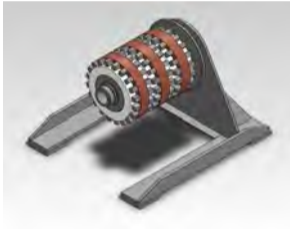
mehrsträngige permanenterregte Transversalflussmaschine als Direktantrieb

Funktionsprinzip von Transversalflussmaschinen



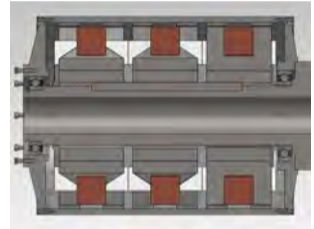
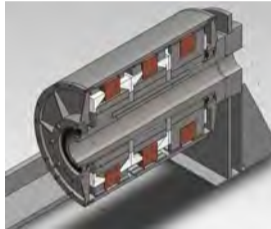
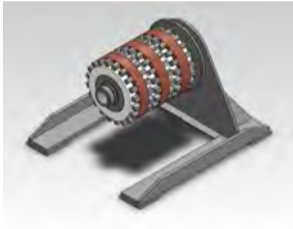
- U-förmige Statorjoche
- Ringwicklung → magnetischer Fluss senkrecht zur Bewegungsrichtung
- gegenüberstehende Pole besitzen entgegengesetzte Polariät

Funktionsprinzip von Transversalflussmaschinen



- U-förmige Statorjoche
- Ringwicklung → magnetischer Fluss senkrecht zur Bewegungsrichtung
- gegenüberstehende Pole besitzen entgegengesetzte Polariät

Funktionsprinzip von Transversalflussmaschinen



- allen Statorpolen erzeugen den gleichen magnetische Fluss
- Weiterbewegung des Rotors → Richtungsänderung des Statorflusses
- Magnete erzeugen Streufluss, der den Hauptfluss reduzieren kann

Eigenschaften von Transversalflussmaschinen

Vorteile

- Ringwicklung → keine Wicklungsköpfe, einfachere Fertigung
- geringe Aktivmasse
- theoretisch beliebig kleine Polteilung → FEM-Analyse

Nachteile

- lastabhängige und lastunabhängige Drehmomentenwelligkeit
- exakter mechanischer Versatz zwischen den Wicklungen notwendig
- Kraftdichte durch Streuflüsse und Eisensättigung beeinflusst

Eigenschaften von Transversalflussmaschinen

Vorteile

- Ringwicklung → keine Wicklungsköpfe, einfachere Fertigung
- geringe Aktivmasse
- theoretisch beliebig kleine Polteilung → FEM-Analyse

Nachteile

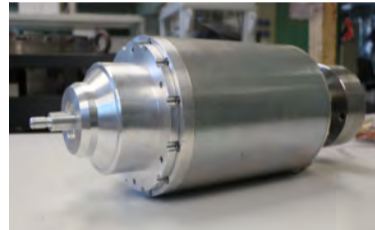
- lastabhängige und lastunabhängige Drehmomentenwelligkeit
- exakter mechanischer Versatz zwischen den Wicklungen notwendig
- Kraftdichte durch Streuflüsse und Eisensättigung beeinflusst

Konstruktionsansätze



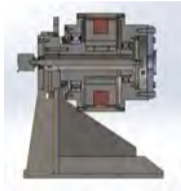
- modulare Bauweise erlaubt unkonventionellen mechanischen Konstruktionsansatz mit besserer Lastverteilung
- Wicklungen sind elektrisch und magnetisch entkoppelt

Konstruktionsansätze



- modulare Bauweise erlaubt unkonventionellen mechanischen Konstruktionsansatz mit besserer Lastverteilung
- Wicklungen sind elektrisch und magnetisch entkoppelt

Konstruktionsansätze



- „elektrischer Lagerbock“- ohne Getriebe, mechanische Kopplung über die Wasserradkonstruktion
- mindestens zwei elektrische Stränge für feldorientierte Regelung mit kontinuierlichem Drehmoment

Konstruktionsansätze



- „elektrischer Lagerbock“- ohne Getriebe, mechanische Kopplung über die Wasserradkonstruktion
- mindestens zwei elektrische Stränge für feldorientierte Regelung mit kontinuierlichem Drehmoment
- alternativ Inselnetzbetrieb mittels Gleichrichter und batteriegestützter Wechselrichtung

Prototypen von Transversalflussgeneratoren

Otto von Guericke Universität Magdeburg
 Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
 Institut für Elektrische Energietechnik

Viel-Ph-Gen	Titel	Datum	Typ
R. Leidhold	TFM Ausenläufer Prototyp 1	02.2017	11/12-AL-11/17

Dieses Datenblatt beschreibt die technischen Parameter und Konzepte des ersten Prototypen eines dreiphasigen Transversalflussgenerators mit Ausenläufer. Dieser Generator wurde im Rahmen des Forschungsprojektes Wachsenstadium Fluoroxen-Plus im Verbundprojekt VPE speziell als Laborantrieb entwickelt, um das Betriebsverhalten eines Generators für Wasserkraftanlagen unter Laborbedingungen zu untersuchen.

Wirkungsgrad η

Mechanischer Aufbau der Maschine

Dieser Generator ist eine dreiphasige permanentmagnetgesteuerte Synchronmaschine mit Ausenläufer. Der Stator besteht aus drei Ringwicklungen, die von U-förmigen Hochspannungsisolatoren umschlossen sind. Auf dem Läufer, der dem Eisenkern ausbleibt, befinden sich die Permanentmagnete mit technischer Polarisierung.

Otto von Guericke Universität Magdeburg
 Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
 Institut für Elektrische Energietechnik

Viel-Ph-Gen	Titel	Datum	Typ
R. Leidhold	TFM Ausenläufer Prototyp 2	02.2018	11/17-AL-11/17

Dieses Datenblatt beschreibt die technischen Parameter eines zweiphasigen getriebenen Transversalflussgenerators mit Ausenläufer. Dieser Generator wurde im Rahmen des Forschungsprojektes Wachsenstadium Fluoroxen-Plus im Verbundprojekt VPE als getriebener Generator für ein Wasserrad entwickelt.

Mechanischer Aufbau der Maschine

Dieser Generator ist eine zweiphasige permanentmagnetgesteuerte Synchronmaschine mit Ausenläufer. Der Stator besteht aus zwei Ringwicklungen, die von U-förmigen Hochspannungsisolatoren umschlossen sind. Auf dem Läufer, der dem Eisenkern ausbleibt, befinden sich die Permanentmagnete mit technischer Polarisierung.

Otto von Guericke Universität Magdeburg
 Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
 Institut für Elektrische Energietechnik

Viel-Ph-Gen	Titel	Datum	Typ
R. Leidhold	TFM Ausenläufer HKT	08.2018	11/18-AL-11/17

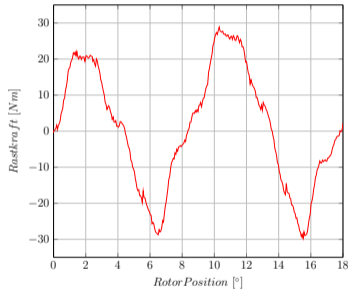
Dieses Datenblatt beinhaltet die technischen Parameter und Konzepte eines dreiphasigen Transversalflussgenerators mit Ausenläufer. Dieser Generator wurde speziell als Prototyp für eine hydroelektrische Turbine entwickelt und soll als dreiphasiger Generator bei geringem Drehmoment unter Wasser eingesetzt werden.

Wirkungsgrad η

Mechanischer Aufbau der Maschine

Bei diesem Generator handelt es sich um eine dreiphasige permanentmagnetgesteuerte Synchronmaschine. Der Stator besteht aus drei Ringwicklungen, die von U-förmigen Hochspannungsisolatoren umschlossen sind. Auf dem Läufer, der dem Eisenkern ausbleibt, befinden sich die Permanentmagnete mit technischer Polarisierung.

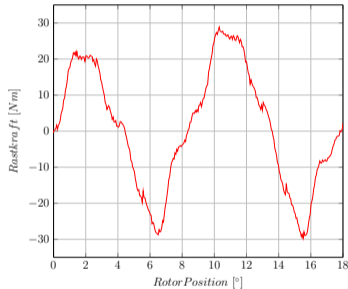
Experimentelle Untersuchungen



- die Ausprägung der Drehmomentenwelligkeit steht in Beziehung zur Strangzahl
- lastunabhängiges Rastmoment
- lastabhängiges Pulsationsmoment
- $f_{RK} = 2 \cdot p \cdot n$ (Rastkraftfrequenz)

Drehmomentschwingungen führen zu unerwünschten Vibrationen, Geräuschen und Verschleiß

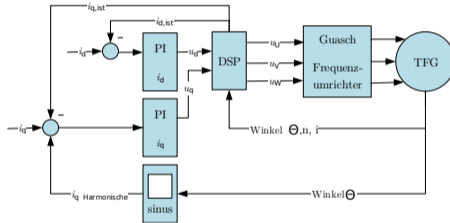
Experimentelle Untersuchungen



- die Ausprägung der Drehmomentenwelligkeit steht in Beziehung zur Strangzahl
- lastunabhängiges Rastmoment
- lastabhängiges Pulsationsmoment
- $f_{RK} = 2 \cdot p \cdot n$ (Rastkraftfrequenz)

Drehmomentschwingungen führen zu unerwünschten Vibrationen, Geräuschen und Verschleiß

Regelungstechnische Kompensation der Drehmomentenwelligkeit - Stromharmonische



$$M_{sum} = M_M + M_{OW}(n, z_p) + M_{komp}$$

mit

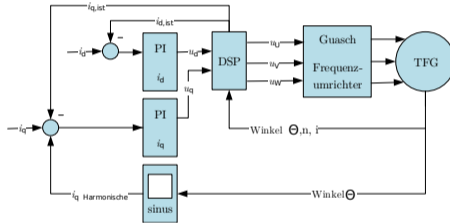
$$M_{komp} = \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot \Psi_{PM} \cdot i_{qk}$$

und

$$i_{qk} = \sum_{\nu=1}^{\infty} \hat{i}_{qk,\nu} \cdot \sin(\nu \cdot \theta + \varphi_{\nu})$$

- Der Kompensationsstrom wird synchron zur Rotorlage ermittelt, durch eine Fouriertransformation in einzelne Sinusanteile zerlegt und anschließend werden gezielt Stromharmonische aufgeschaltet

Regelungstechnische Kompensation der Drehmomentenwelligkeit - Stromharmonische



$$M_{\text{sum}} = M_M + M_{\text{OW}}(n, z_p) + M_{\text{komp}}$$

mit

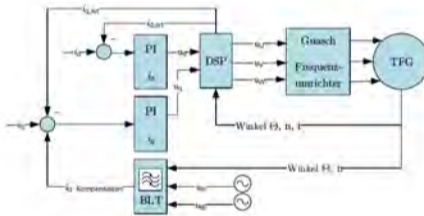
$$M_{\text{komp}} = \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot \Psi_{PM} \cdot i_{qk}$$

und

$$i_{qk} = \sum_{\nu=1}^{\infty} \hat{i}_{qk, \nu} \cdot \sin(\nu \cdot \theta + \varphi_{\nu})$$

- Der Kompensationsstrom wird synchron zur Rotorlage ermittelt, durch eine Fouriertransformation in einzelne Sinusanteile zerlegt und anschließend werden gezielt Stromharmonische aufgeschaltet

Regelungstechnische Kompensation der Drehmomentwelligkeit - Blindleistungstheorie



$$p = u_{i\alpha} \cdot i_{\alpha} + u_{i\beta} \cdot i_{\beta}$$

$$q = u_{i\alpha} \cdot i_{\beta} + u_{i\beta} \cdot i_{\alpha}$$

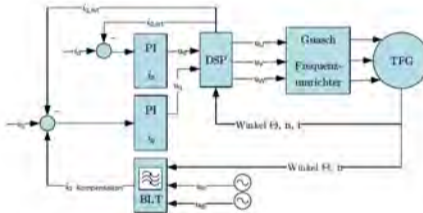
durch umformen ergeben sich die Ströme

$$i_{\alpha} = \frac{p \cdot u_{i\alpha} - q \cdot u_{i\beta}}{u_{i\alpha}^2 + u_{i\beta}^2}$$

$$i_{\beta} = \frac{p \cdot u_{i\beta} + q \cdot u_{i\alpha}}{u_{i\alpha}^2 + u_{i\beta}^2}$$

- Blindleistungsanteil wird zu NULL geregelt und q-Strom wird zur Kompensation aufgeschaltet.

Regelungstechnische Kompensation der Drehmomentwelligkeit - Blindleistungstheorie



$$p = u_{i\alpha} \cdot i_{\alpha} + u_{i\beta} \cdot i_{\beta}$$

$$q = u_{i\alpha} \cdot i_{\beta} + u_{i\beta} \cdot i_{\alpha}$$

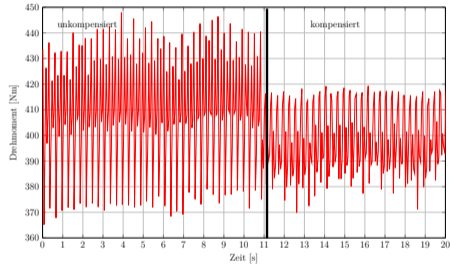
durch umformen ergeben sich die Ströme

$$i_{\alpha} = \frac{p \cdot u_{i\alpha} - q \cdot u_{i\beta}}{u_{i\alpha}^2 + u_{i\beta}^2}$$

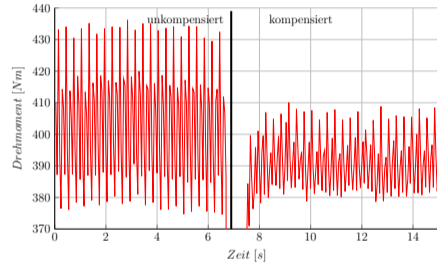
$$i_{\beta} = \frac{p \cdot u_{i\beta} + q \cdot u_{i\alpha}}{u_{i\alpha}^2 + u_{i\beta}^2}$$

- Blindleistungsanteil wird zu NULL geregelt und q-Strom wird zur Kompensation aufgeschaltet.

Regelungstechnische Kompensation der Drehmomentenwelligkeit

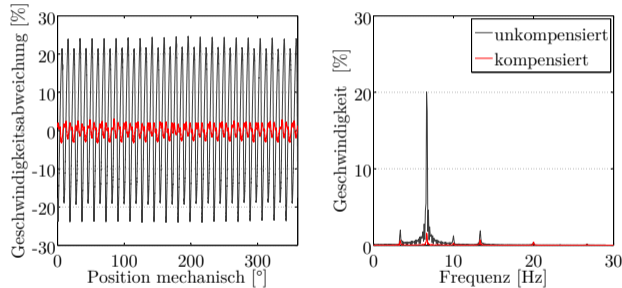


Aufschaltung der Stromharmonischen
bei 10 min^{-1}



Anwendung der Blindleistungtheorie
bei 10 min^{-1}

Regelungstechnische Kompensation der Drehmomentenwelligkeit



Auswirkung der Kompensation auf das Frequenzspektrum

Zusammenfassung

- Direktantrieb mit Leistungsskalierung
- TFG im feldorientierten geregelten Betrieb → Kompensation der Drehmomentenwelligkeit
- Mechanisch getrennt- elektrisch kombinierte Varianten möglich
- Inselnetzfähigkeit
- Integration in die Wasserkraftmaschine
- Gebrauchsmusteranmeldung

Ausblick

- Fertigstellung der Flotilleneinheit
- Feldversuche im Insel- und Netzbetrieb



Zusammenfassung

- Direktantrieb mit Leistungsskalierung
- TFG im feldorientierten geregelten Betrieb → Kompensation der Drehmomentenwelligkeit
- Mechanisch getrennt- elektrisch kombinierte Varianten möglich
- Inselnetzfähigkeit
- Integration in die Wasserkraftmaschine
- Gebrauchsmusteranmeldung

Ausblick

- Fertigstellung der Flotilleneinheit
- Feldversuche im Insel- und Netzbetrieb



Danke für Ihre Aufmerksamkeit!