

Drehzahlvariabler Betrieb von Pumpspeicherkraftwerken

15. Symposium Energieinnovation

DI Thomas Holzer

Überblick

- Warum drehzahlvariabler Betrieb?
- Bestehende Topologien in Pumpspeicherkraftwerken
- Doppelt gespeiste Asynchronmaschine
- Synchrongenerator mit Vollumrichter
- Frequenzumrichtertopologie für Vollumrichter

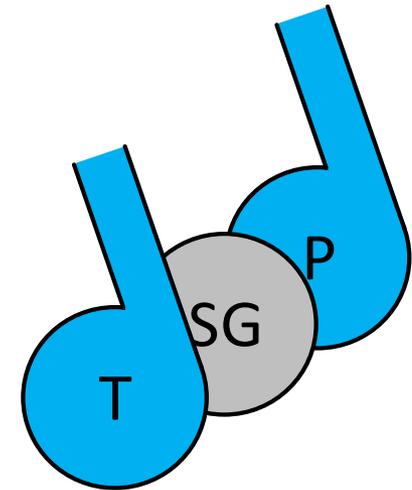
Drehzahlvariabler Betrieb

- Variabler Leistungsbereich beim Pumpen ($P \sim n^3$)
- Wirkungsgradsteigerung im Turbinenbetrieb
 - Turbinenwirkungsgrad abhängig von P, H, Q
 - Erweiterung der Einsatzgrenzen der Turbinen
 - Besonders bei saisonbedingten Fallhöhenunterschieden
 - Verbessertes Teillastbetrieb

Konzepte für Pumpspeicherkraftwerke (1)

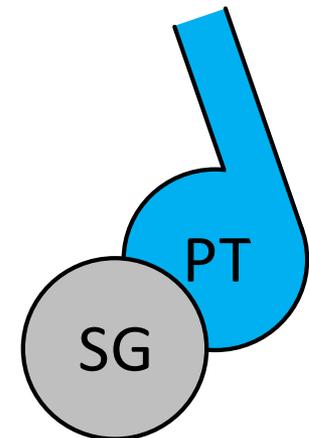
■ Ternärer Maschinensatz

- Gleiche Drehrichtung für Turbinen- und Pumpbetrieb
- Pumpenstart mit Turbine möglich
- Fixe Drehzahl im Pumpbetrieb
- Hydraulischer Kurzschluss
 - Gesamtleistungsbilanz



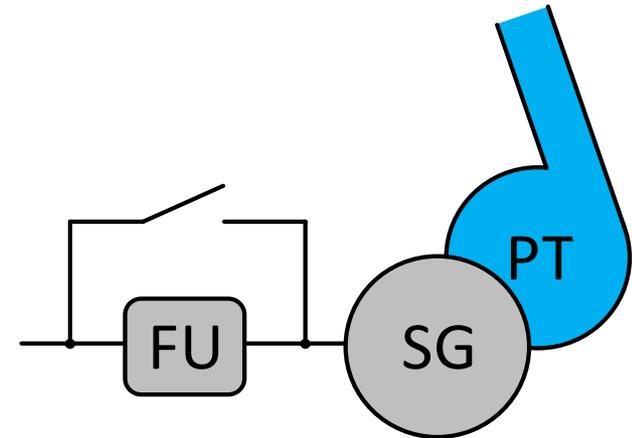
■ Pumpturbine

- Unterschiedliche Drehrichtung für Turbinen- und Pumpbetrieb
- Fixe Drehzahl im Pumpbetrieb
- Betrieb mehrerer kleiner Einheiten
- Zusatzeinrichtung zum Anfahren



Konzepte für Pumpspeicherkraftwerke (2)

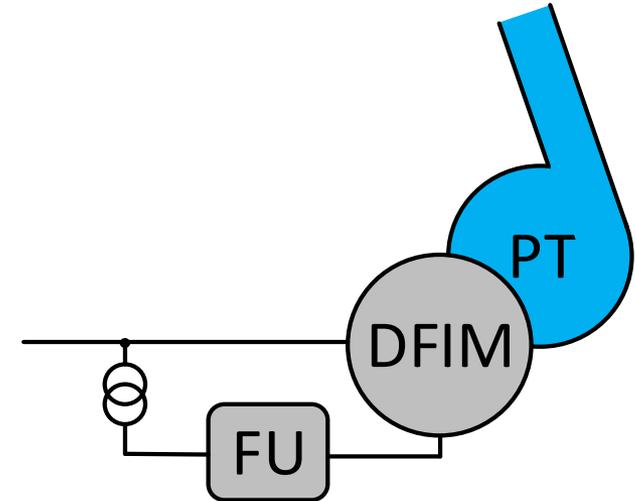
- Umrichter für Pumpbetrieb
 - Turbinenbetrieb direkt am Netz
 - Bypass Schalter
 - Keine Verluste durch Umrichter
 - Drehzahlvariabler Pumpbetrieb
 - Häufige Retrofit-Variante
 - Wicklungsisolationsbeanspruchung
 - Zusätzliche Verluste
 - STATCOM



- Doppelt gespeiste Asynchronmaschine
- Synchrongenerator mit Vollumrichter

Doppelt gespeiste Asynchronmaschine (1)

- Stator fix am Netz
- Rotor von Umrichter gespeist
- Umrichter nur für Rotorleistung
 - ca. 15% - 30%
- Konstruktive Grenzen des Rotors
 - Maximale Rotorleistung
 - Maximale Umfangsgeschwindigkeit (hohe Drehzahlen)
 - Variable Drehzahl nur in kleinem Bereich
 - Pumpenstart nur mit entleerter Pumpe
 - Anforderungen durch den Grid Code (LVRT)



Doppelt gespeiste Asynchronmaschine (2)

- Beispiel Leistungsbereich

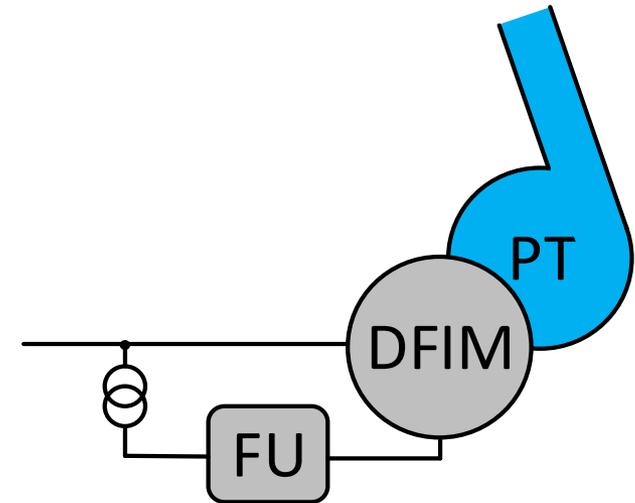
$$n_{min} = n_{nenn} - 15 \%$$

$$P = k \cdot n^3$$

$$300 \text{ MW} = k \cdot (300 \text{ rpm})^3$$

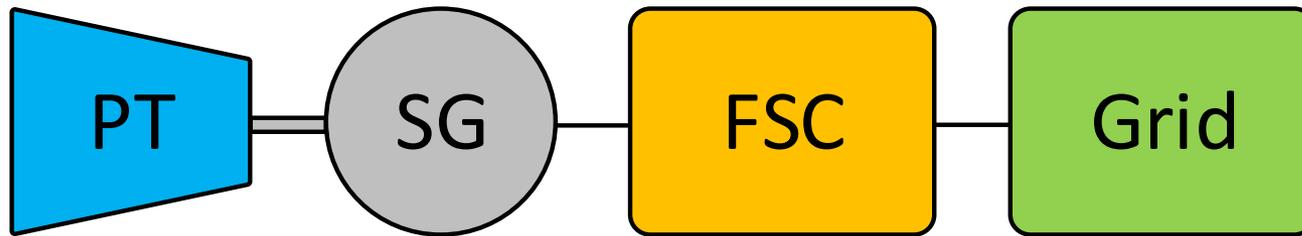
$$k = \frac{300 \text{ MW}}{(300 \text{ rpm})^3} = 300^{-2} \frac{\text{MW}}{\text{rpm}^3}$$

$$k \cdot (255 \text{ rpm})^3 = 184 \text{ MW}$$



n	255 rpm	300 rpm
P	184 MW	300 MW

Synchrongenerator mit Vollumrichter



- Blindleistungsbereitstellung durch Vollumrichter
- Netzanforderungen werden durch Vollumrichter eingehalten (LVRT)
- Pumpenstart im Wasser (hohes Anfahrmoment)

Anforderungen an den Vollumrichter

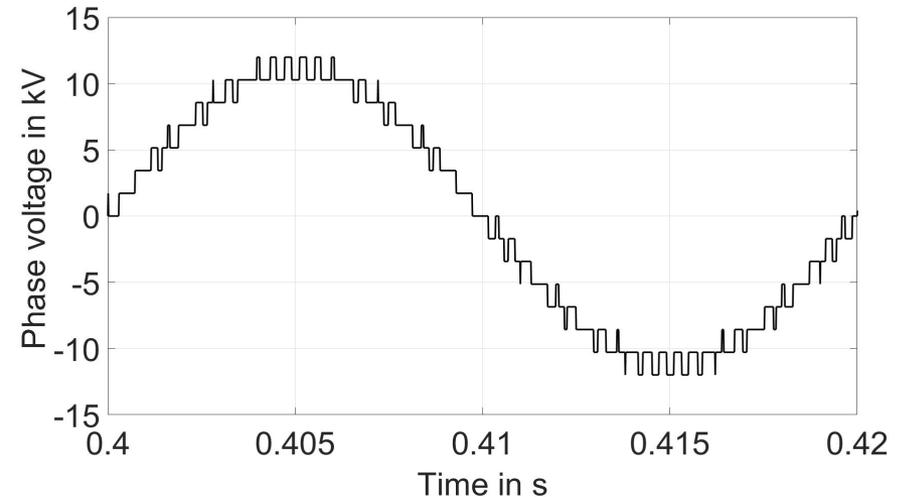
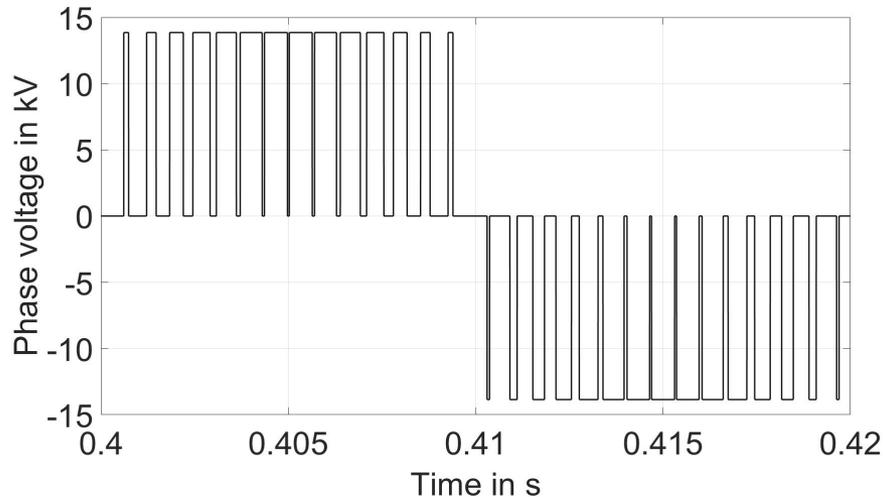
- Hohe Nennleistung
 - > 100 MVA

- Mittelspannungsebene
 - > 13.5 kV verkettet effektiv

- Leistungsfluss in beide Richtungen
 - Turbine und Pumpe

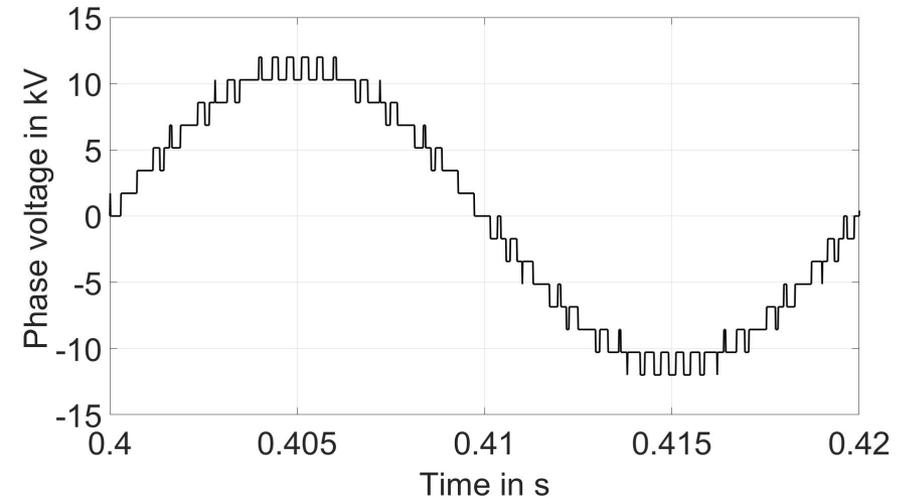
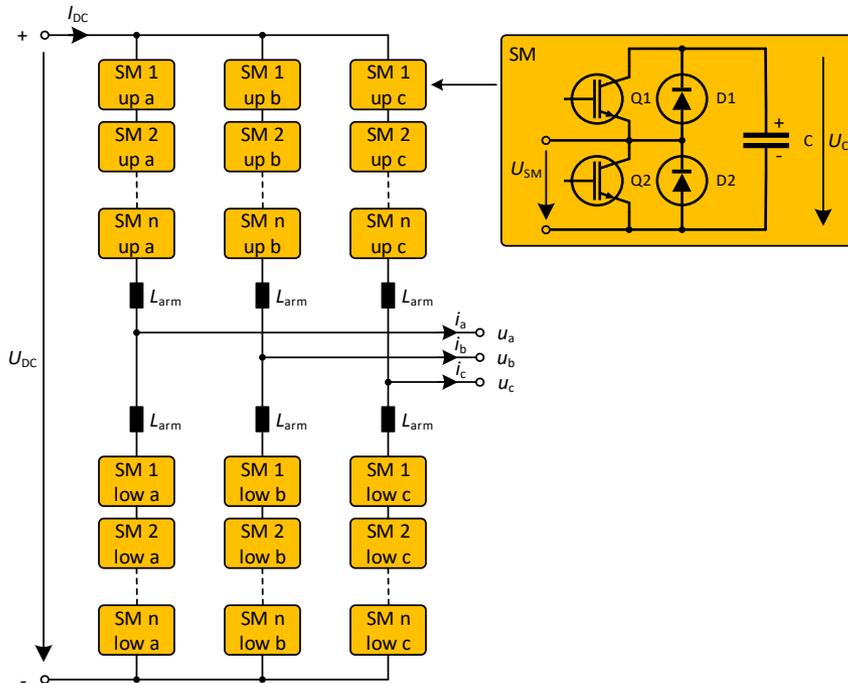
- Kleine zusätzliche Beanspruchung der Wicklungsisolation
 - Kleines du/dt

3-level vs. 15-level Frequenzumrichter



- Wicklungsisolationsbeanspruchung
- THD – Generator (zusätzliche Verluste)
- THD – Netzvorgabe

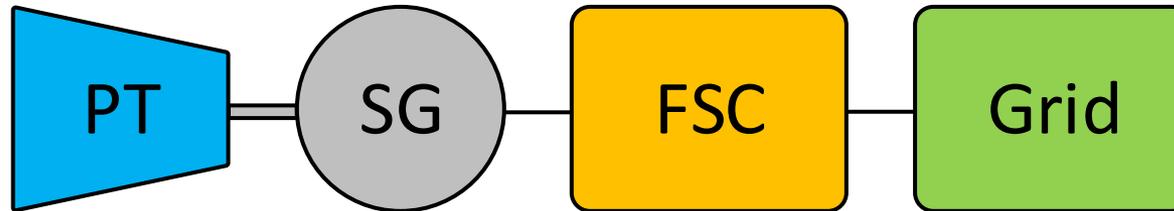
Modular Multi-Level Converter



■ Vorteile MMC

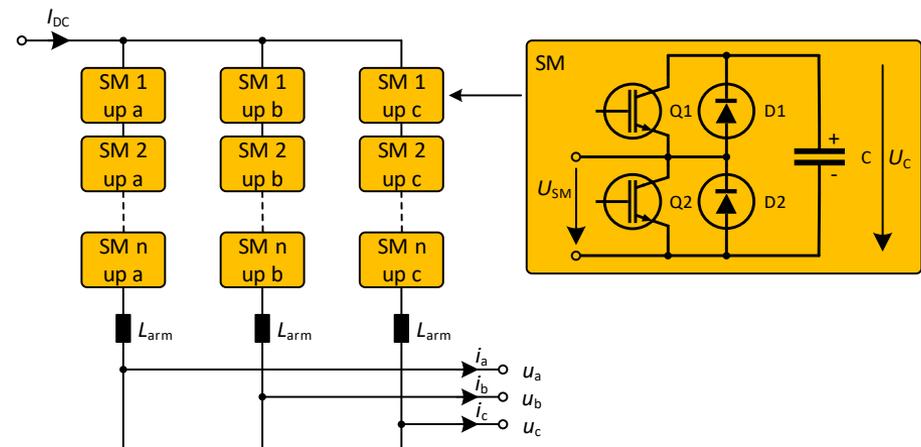
- Kleine THD
- Blindleistungsbereitstellung
- Individuelle SM-Kondensatoren – kleiner Zwischenkreis!
- Fehlertoleranz (Überbrücken oder zusätzliche Module)
- Erprobt in HVDC

Synchrongenerator mit Vollumrichter



- + Drehzahlvariables Pumpen
- + Wirkungsgradoptimierung
- + Blindleistungsbereitstellung
- + Netzanforderungen
- + Pumpenstart im Wasser

- Gesamtwirkungsgrad
- Kosten
- Regelung MMC
 - Capacitor voltage balancing
 - Circulating current control



Zusammenfassung / Ausblick

- Drehzahlvariabler Betrieb schon lange ein Thema in großen Pumpspeicherkraftwerken
- Heutzutage besonders wichtig für weiteren Ausbau und Integration von Wind- und Solarenergie
- Zukünftige Netzanforderungen
- Entwicklung in der Leistungselektronik

A white line-art illustration of a building facade, likely a university building, featuring a central dome and classical architectural elements like columns and arches. The drawing is semi-transparent and serves as a background for the main text.

Wissen ■ Technik ■ Leidenschaft