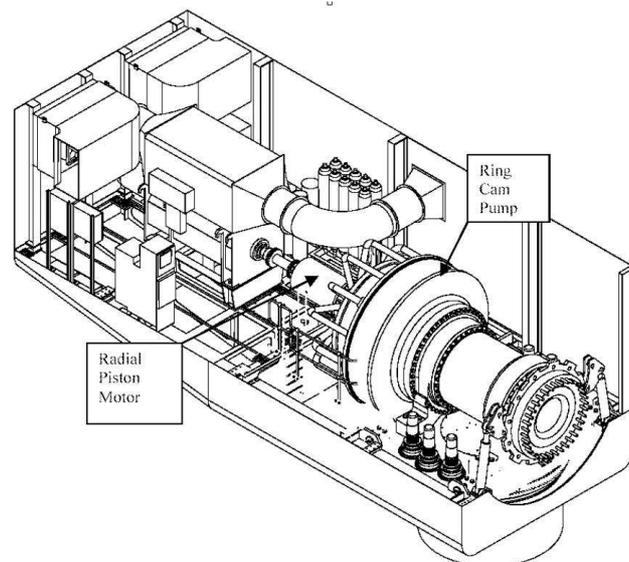


Hydraulische Kraftübertragung in Windenergieanlagen

Dr. Uwe Stein
Artemis Intelligent Power Ltd
Dezember 2006



Möglicher Aufbau einer 3 MW Gondel

Bei den heutigen Windenergieanlagen (WEA) im Multi-MW-Bereich stellt das Getriebe eine der größten Herausforderungen an die Ingenieurskunst dar. Idealerweise würde das Getriebe mit variablen Übersetzungsverhältnissen und dem Abfangen von Drehmomentspitzen arbeiten, was aber mit den heutigen konventionellen Getrieben nicht erreicht werden kann. Mit der Notwendigkeit immer größere Anlagen zu bauen, um den ökonomisch sinnvollen Einsatz im Offshore-Bereich zu gewährleisten, verstärkt sich das Problem noch, denn die Anforderungen an das Getriebe wachsen exponentiell mit der WEALeistung. Mit Verdopplung des Rotordurchmessers bei Windenergieanlagen wird die vierfache Anlagenleistung erreicht, was aber auch zur Folge hat, dass sich die Rotordrehzahl für eine gegebene Schnelllaufzahl halbiert. Da sich die Leistung aus Drehzahl Drehmoment ergibt, resultiert daraus ein achtfaches Drehmoment mit dem doppelten Übersetzungsverhältnis. Hinzu kommt, dass sich bei Groß-WEA durch die unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten am oberen und unteren Teil des Rotorblatts und durch den Staueffekt vor dem Mast starke Schwingungen im Antriebsstrang aufbauen können. Langsam laufende Vielpolgeneratoren mit Netzwandlern könnten zwar eine Lösung darstellen, haben aber den Nachteil, dass sie in den meisten Fällen teurer und weitaus schwerer als eine Getriebestufe sind. Dennoch betrachten heute mehr und mehr Firmen das schon lange von Enercon verfolgte Prinzip als zukunftsweisend, da die getriebelose WEA klare Vorteile hinsichtlich der Zuverlässigkeit und Betriebskosten hat, welches gerade im offshore-Einsatz eine Voraussetzung ist.

Das Problem der Kraftübertragung in Großanlagen erkannte auch schon Professor Stephen Salter aus Schottland als er Ende der 70er Jahren mit der Arbeit an Wellenkraftanlagen begann. Bei diesen Anlagen ist das Problem der Kraftübertragung noch größer als bei den Windenergieanlagen, da hier die Absorbergeschwindigkeiten in den meisten Fällen wesentlich ungleichmäßiger und zudem von wechselnder Richtung sind. Nach der Betrachtung verschiedener Technologien, wie mechanischer Getriebe, Lineargeneratoren usw. zeichnete sich ab, dass die hydraulische Übertragung die kompakteste und flexibelste Lösung bieten würde.

Hydrostatische Antriebe (bestehend aus einer Hydropumpe, welche über eine Leitung einen Hydromotor antreibt) werden seit langem standardmäßig dort eingesetzt, wo es notwendig ist, große Kräfte und Energien zuverlässig zu übertragen. An Antrieben in großen Nutzfahrzeugen, z.B. in Stein-, Zucker- und Papiermühlen werden ähnliche Anforderungen wie die in der Windenergie gestellt. Es gilt hier, große Leistungen mit extrem hohen Drehmomenten über Jahre hinweg zuverlässig zu übertragen. Bei diesen Anwendung allerdings in umgekehrter Richtung wie bei der Energiegewinnung.

Neben der Fülle an Vorteilen, die das hydrostatische Getriebe zu bieten hat, wie das stufenlos verstellbare und große Übersetzungsverhältnis und die flexible und kompakte Bauweise, bringt es aber auch eklatante Probleme mit sich. Allen voran ist hier der schlechte Wirkungsgrad zu nennen,

der sicherlich auch der Grund ist, warum diese Art von Getrieben nicht den Einzug in die Nutzung der erneuerbaren Energien gemacht hat.

Gerade bei der seriellen Kraftübertragung ist dieser wichtig, da hier die gesamte Energie in hydraulische und dann wieder in Rotationsenergie übertragen werden muss. Die vom Wirkungsgrad her beste konventionelle Maschine für den Antrieb des Generators wäre die nach dem Schrägachsen Prinzip arbeitende Axialkolbenmaschine mit idealem Druck-, Drehzahl- und Verstellvolumen. Der Wirkungsgrad fällt aber rapide ab, sobald man sich vom optimalen Bereich entfernt (siehe Abbildung Seite 3).

Bei der Umsetzung der Rotationsenergie der Rotorwelle in hydraulische Energie sieht es ein klein wenig besser aus. Dafür könnten sogenannte Mehrhub Radialkolbenpumpen eingesetzt werden, welche Wirkungsgrade von bis zu 95% erreichen können. Dennoch müssten diese Getriebe in jeden Fall überdimensioniert werden, damit sie die vorhandenen Lastspitzen unbeschädigt bewältigen können. Dieses hat dann zur Folge, dass sie praktisch nie unter Vollast arbeiten. Wenn die Teillastwirkungsgrade beider Maschinen über einen typischen Zyklus miteinander verglichen werden zeigt sich, dass keine zufriedenstellenden Wirkungsgrade erreicht werden können.

Versuchsanlagen

Einige Versuchsanlagen, die mit diesem Prinzip arbeiten, sind dennoch gebaut worden. So zum Beispiel die Windkraftanlage von Sir Henry Lawson Tancred in Yorkshire, oder auch die 1.3-MWe Bendix/Schachle Windkraftanlage, in den USA. Bei den Wellen- und Gezeitenkraftanlagen hat man auch schon dieses Prinzip angewendet. So arbeitet die Wellenkraftanlage Pelamis der schottischen Firma OPD und der Gezeitenrotor der Firma „Lunar Technology“ mit einem vollständig hydraulischem Antriebsstrang. Bei allen diesen Projekten hat man die geringen Übertragungswirkungsgrade in Kauf genommen, um die Vorteile der flexiblen hydraulischen Kraftübertragung zu erhalten.

Dieser Kompromiss war den schottischen Ingenieuren nicht gut genug für ihre damals schon im MW Bereich geplante Wellenkraftanlage und so betrachtete man das Problem noch einmal von den grundlegenden Prinzipien her. Hieraus entstand dann das sogenannte Digital Displacement™ (Digital

Verdrängung) Prinzip, welches das Potential zeigte, weitaus bessere Wirkungsgrade zu erreichen. Als die Arbeit damit dann richtig begann, gingen die staatlichen Gelder aus, denn Wellenkraft war keine Option mehr, die die britische Regierung in den nun frühen 80ern als zukunftsreichlich betrachtete. Die finanziellen Mittel wurden lieber für die Atomenergie bereitgestellt. Fast wäre somit auch die Arbeit an der digitalen Pumpe zu Ende gewesen, hätten Dr. William Rampen und Prof. Stephen Salter nicht das Potential dieser Technologie in der Mobilhydraulik und in der Fahrzeugtechnik erkannt und die Firma „Artemis Intelligent Power Ltd“ gegründet. So hat die Technologie nun schon über 10 Jahre weitere Entwicklungsarbeit in diesen Bereichen erlebt und in verschiedenen Gebieten einen Stand erreicht, bei dem die Produktentwicklung beginnen kann. Die Arbeit im Windkraftanlagen Bereich ist da noch etwas zurück. Eine Systembetrachtung und erste Versuche an den verschiedenen Komponenten für ein solches Getriebe im Multi-MW Bereich wurde schon durchgeführt. Der Bau eines ersten 800 kW Versuchsgetriebes soll Ende des Jahres 2006 beginnen. In 2 bis 3 Jahren will man dann diese Technologie in einer Windenergieanlage vorstellen.



Prüfstand zum Testen der Nockenwellen-Kolben-Verbindung.



Erste 3-Zylinder Digital Displacement™ Versuchsanlage

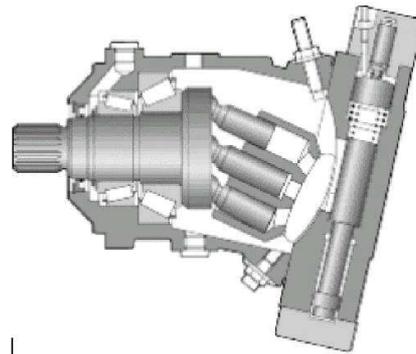


Innenleben- 3-ZylinderDigitalDisplacement™

Digital Displacement™, was ist das?

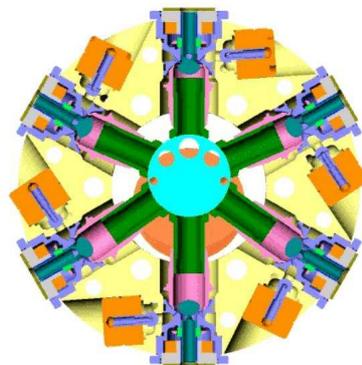
Der grundlegende Unterschied zwischen der digitalen und der konventionellen Hydraulikmaschine liegt in der Art und Weise wie ihre Verdrängungsvolumen (gepumptes Volumen pro Umdrehung der Welle) gesteuert werden. Eine Veränderung des Verdrängungsvolumens ist die Voraussetzung, um ein verstellbares Getriebeverhältnis zu erzeugen, ähnlich wie beim mechanischen Getriebe verschiedene Zahnräder mit verschiedener Anzahl an Zähnen benötigt werden.

Konventionelle Hydraulikmaschinen steuern das Verdrängungsvolumen, indem sie den Kolbenhub der Maschine regeln. Die Maschinen sind typischerweise als Axialkolbenmaschinen in der sogenannten Schrägachsen oder Schrägscheiben Bauweise aufgebaut. In diesem Aufbau rotieren die Kolben im Zylinderblock um die Welle und arbeiten gegen eine schräg dazu angeordnete Platte. Zur Regelung des Schluckvolumens wird dann der Winkel zwischen den Kolben und der Platte verändert (siehe Abbildung).



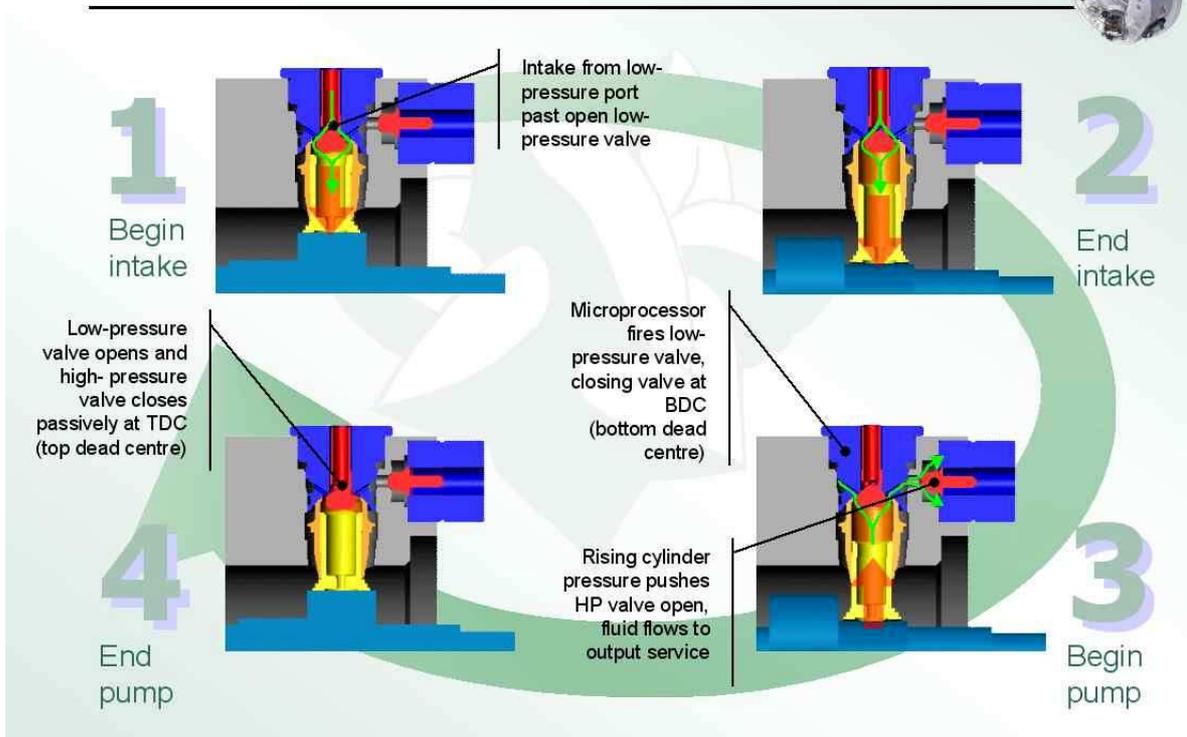
Konventionelle Schrägachsen Maschine

Bei der Digital Displacement™ Technologie hingegen wird die Verstellung des Verdrängungsvolumen über die Ansteuersequenz der einzelnen Kolben erreicht. Die Maschinen sind typischerweise als Radialkolbenmaschinen konstruiert, da dieses der vom Wirkungsgrad her günstigste Aufbau ist. Auf jedem Kolben befindet sich ein vom Mikroprozessor angesteuertes Ein- und Auslaßventil. Der Rechner kann mithilfe des Wellensensorsignals die Ventile zum richtigen Zeitpunkt ansteuern, um ein Pumpen, oder einen Leerlauf des jeweiligen Zylinders zu bewirken. Abbildung x zeigt dieses Prinzip für den Pumpvorgang. Das Verdrängungsvolumen der Maschine wird durch eine digitale Ansteuersequenz der Zylinder gebildet. So ergibt z.B. eine Ansteuersequenz von 1010101010... 50% und 111111... 100 % Verstellvolumen. Die möglichen Verstellvolumina sind hierbei unabhängig von der Zylinderzahl der Maschine. Über einen genügend langen Zeitraum kann jedes Verstellvolumen erreicht werden. Soll z.B. 55.5 % erreicht werden, müssen 555 Zylinder aus Tausend angesteuert werden.



Schnitt durch eine 6 Zylinder DigitalDisplacement™ Maschine

Pumping



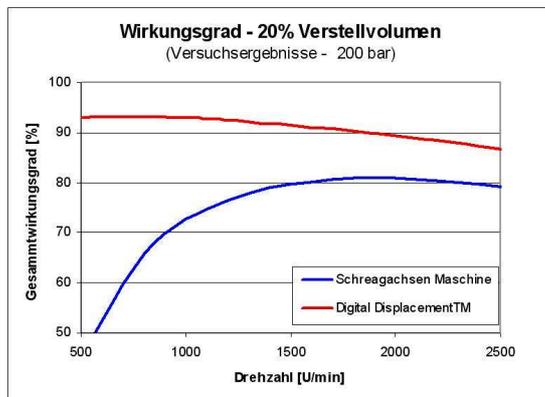
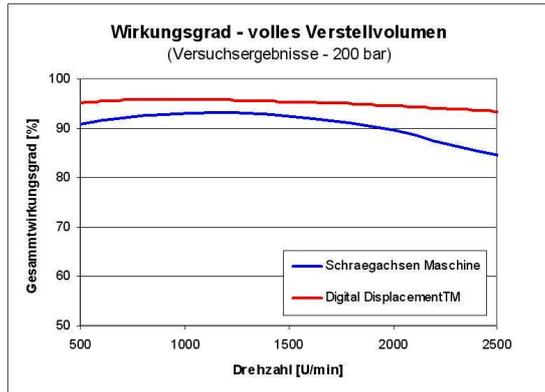
Digital Displacement™ Pump Prinzip

Der Hauptvorteil dieses Prinzips liegt weniger in der genaueren und schnelleren Ansteuerung als vielmehr in dem wesentlich besseren Wirkungsgrad, gerade im Teillastbereich. Der bessere Wirkungsgrad bei vollem Verdrängungsvolumen erklärt sich durch den Radialkolbenaufbau der Maschine. Bei diesem Aufbau befindet sich der Exzenter im Zentrum der Maschine, wo die Umfangsgeschwindigkeiten und damit die Reibungsverluste niedrig sind. Die Ventile hingegen sind außen an der Maschine angeordnet, wo genügend Bauraum vorhanden ist, um die Strömungsverluste gering zu halten. Bei der Axialkolben Maschine muß hier ein Kompromiss gemacht werden. Nimmt man einen zu großen Durchmesser sind die Reibungsverluste zu groß, ist er zu klein hat man nur unzureichenden Raum für die Ventilplatte. Weiterhin ist es bei dem radialen Aufbau der Digital Displacement™ Maschine möglich, die Seitenkräfte zwischen Kolben und Zylinder zu eliminieren. Dieses wird erreicht, indem die Zylinder am Kopfende kippen und sich die Kolben-Zylinder-Einheit immer zum Zentrum des Exzenters ausrichtet.

Der wesentliche Vorteil im Wirkungsgrad der digitalen Maschine gegenüber der konventionellen zeigt sich aber erst, wenn die Maschine mit kleinem Verdrängungsvolumen betrieben wird, welches besonders bei der Kraftübertragung bei den erneuerbaren Energien häufig der Fall ist. Bei der konventionellen Verstellpumpe werden die meisten Verluste, wie durch Leckage, Reibung der Hydraulikflüssigkeit unverändert beibehalten, wenn das Verdrängungsvolumen verringert wird. Dieses rührt daher, das alle Kolben weiterhin unter Druck arbeiten. So können aus 10% Verlusten bei vollem Verstellvolumen, Verluste von 40% bei 25% Verstellvolumen werden.

Bei der Digital Displacement™ Maschine verhält sich dieses grundlegend anders. Beim Zurückfahren des Schluckvolumens werden mehr und mehr Zylinder von der Hochdruckleitung getrennt und durch das Einlassventil mit dem Niederdruckreservoir verbunden. Da die Kolben nun nicht mehr unter Druck arbeiten, erzeugen sie nur noch minimale Reibung und keine Leckage. Das

Einlassventil ist so ausgelegt, dass es nur sehr geringe Strömungswiderstände von weniger als 0.5 bar verursacht, was bei einem typischen Arbeitsdruck der Anlagen von 200 – 400 bar nur minimalen Verlusten entspricht. Abbildung unten zeigt den experimentell ermittelten Gesamtwirkungsgrad (Wellenleistung zu hydraulischer Leistung) einer digitalen Pumpe mit einer maximalen Leistung von 200 kW.

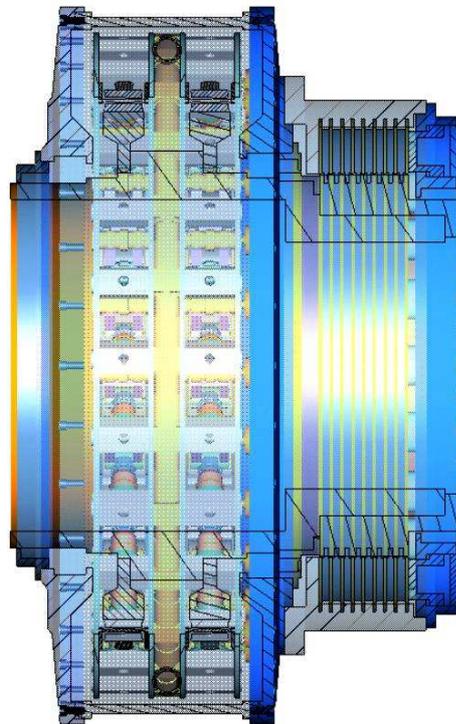


Wirkungsgradvergleich: Schraegachsenmaschine und DigitalDisplacementTMMaschine

Der erforderliche Strombedarf zur Ansteuerung der Ventile ist abhängig vom geförderten Ölvolumen und liegt typischerweise bei 0.25% der hydraulischen Leistung.

Wie sieht eine solche Anlage in der Groß-Windkraftanlage aus?

Beim Einsatz in einer WEA wird das hydraulische Getriebe aus einer langsam laufenden digitalen Mehrhub Pumpe an der Rotorwelle, und aus einem oder mehreren schnell laufenden digitalen Motoren, die den Generatoren antreiben, gebildet. Zwischen ihnen wird dann noch ein hydraulischer Druckspeicher installiert, um Leistungsspitzen während beim Motor die Kolben auf einer einfachen Exzenterwelle angreifen und mit Generatorfrequenz laufen, ist es bei der Pumpe notwendig, einen Mehrhub Aufbau zu wählen (siehe Abbildung).



Entwurf einer 50 Zylinder Digital Displacement™ Mehrhubpumpe für den Einsatz in der 3 MW WEA

Bei diesem Aufbau durchläuft der Kolben eine Mehrzahl von Arbeits- und Leerhüben pro Umdrehung. So ist es möglich, von der niedrigen Drehzahl der Rotorwelle 10 - 20 U/min mithilfe von z.B. 50 Nocken auf eine günstige Kolbenfrequenz von 500 bis 1000 Hüben pro Minute zu kommen. Die Maschinen müssen so ausgelegt werden, dass sie jederzeit die komplette Energie umwandeln können. Für den Motor werden hierbei ca. 1

Liter pro Umdrehung pro MW und für die langsamer laufende Nockenwellenpumpe ca. 100 Liter pro Umdrehung pro MW bei einem Arbeitsdruck von 400 bar benötigt (2 Liter Kolben Volumen * 50 Nocken).

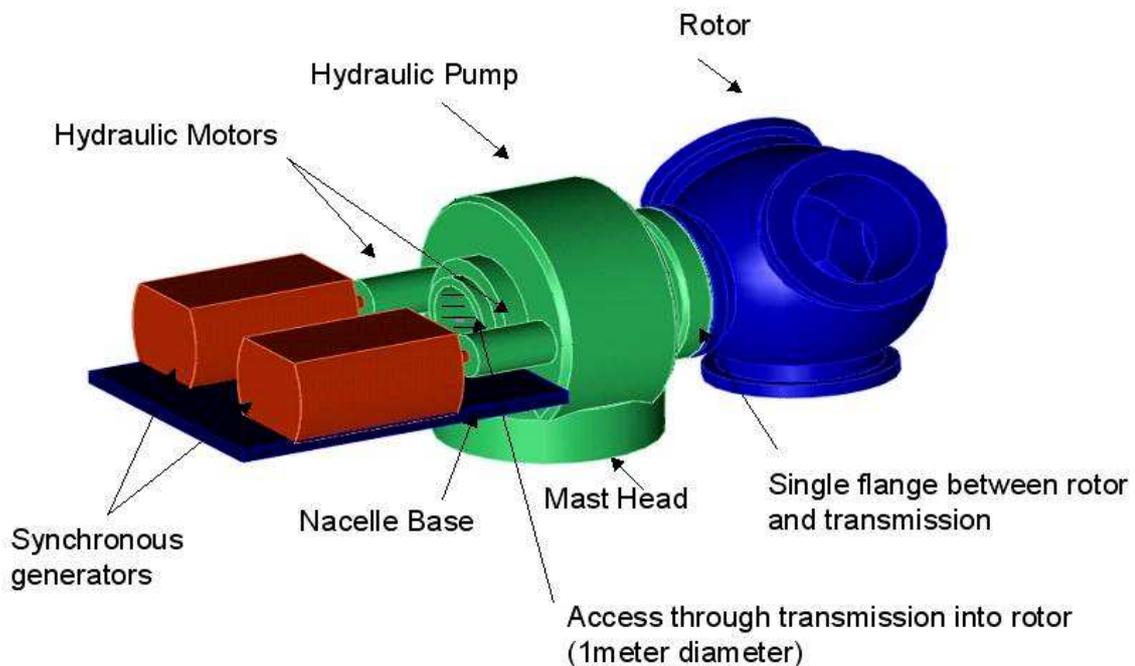
Diese Art des Getriebes gibt weitaus mehr Flexibilität in der Gestaltung von Großwindkraftanlagen als das mechanische Zahnradgetriebe, da es stufenlos verstellbar ist und die Hydromotor-Generator Einheit unabhängig von der Hydromotor-Pumpen Seite angesteuert werden kann.

Durch das vollständig variable Übersetzungsverhältnis ist der Einsatz von Hochspannungs Synchron Generatoren möglich, welche den Vorteil haben, dass hierbei keine schweren Transformatoren und teure Frequenzrichter benötigt werden. Dieser Aufbau hat den weiteren Vorteil das der Antriebsstrang in kleinere Komponenten wie die Mehrhub Pumpe und zwei Hydromotoren

mit Hochspannungsgenerator aufgeteilt wird, wobei diese per Kran von der Gondel herabgelassen werden können. Dieses ist besonders beim off-shore Einsatz wichtig da hier die derzeit sehr schweren Getriebe, Generatoren oder Transformatoren mit nur extrem großen Aufwand ausgetauscht werden können.

Ein weiterer Vorteil besteht in der guten Regelungsmöglichkeit und der Begrenzung des Drehmoments an der Rotorwelle. Das von der Mehrhubpumpe erzeugte Drehmoment ergibt sich aus dem Systemdruck und dem eingestellten Verdrängungsvolumen, welches extrem schnell angesteuert werden kann. Zum Beispiel bei 50 Nocken pro Umdrehung ist es innerhalb einer 1/100 Umdrehung (7.2°) möglich, das abgenommene Drehmoment von null auf voll zu verstellen. Bei einer Rotordrehzahl von 15 U/min entspricht das 25 Hz. Die hohe Ansteuergeschwindigkeit, die Trennung des Rotors vom

Wind Turbine with hydraulic transmission



Massenträgheitsmoment des Generators und die Möglichkeit, Energie kurzzeitig in den Druckspeicher zu leiten, erlauben eine genaue und flexible Regelung der Rotordrehzahl und des Drehmoments an der Nabe.

Durch den in der Druckleitung installierten Hydraulikspeicher können Leistungsspitzen wie sie durch Windböen entstehen aufgefangen werden. Diese Druckspeicher können etwa 12 kJ pro Liter internes Volumen speichern. Soll z.B eine Spitze von 20% Überschußenergie an einer 2.5 MW Anlage für 5 Sekunden abgefangen werden, würden 208 Liter Speichervolumen benötigt. Der Speicher bietet auch die Möglichkeit, einen kurzzeitigen Einbruch des Stromnetzes zu überbrücken ohne das die Anlage gestoppt werden muss.

Es ist vorgesehen, dass zwei unabhängig voneinander arbeitende Digital-Hydromotor-Generator-Einheiten eingesetzt werden. Im Teillastbetrieb ist es somit möglich, einen der Generatoren abzuschalten, wobei durch das Wegfallen der Leerlaufverluste der Wirkungsgrad erhöht wird.

Wirtschaftlichkeit

Ein solcher Vergleich muss sicherlich auf der Systemebene gemacht werden. Hauptkriterien hierfür stellen dann die Kapitalkosten, der Gesamtwirkungsgrad, das Gewicht und gerade im off-shore Bereich die Zuverlässigkeit dar.

Erste Abschätzungen bezüglich der Systemkosten deuten darauf hin, dass hier keine wesentlichen Änderungen entstehen werden. Hierbei wurde ein 1.5 MW Antriebsstrang, bestehend aus mechanischem Getriebe, Asynchrongenerator, Hochspannungswechselrichter und Transformator mit dem hydraulischen System + Synchron-Generator und Druckspeicher verglichen.

Durch Computer Simulationen konnte nachgewiesen werden, dass der insgesamt geringere Getriebewirkungsgrad auf der Systemebene wieder ausgeglichen werden kann. Der Hochspannungs Synchron-Generator erreicht einen besseren Wirkungsgrad als der Asynchrongenerator mit Wechselrichter und Transformator und durch den Druck- Energiespeicher kann eine bessere Ausnutzung von Böen im Volllastbereich erreicht werden.

Mit den sehr hohen Energiedichten, die mit hydraulischen Maschinen erreicht werden können und der Umstellung vom weitaus schwereren Asynchrongenerator auf den weitaus leichteren Hochspannungs Synchron-Generator wird eine wesentliche Verringerung des Gondel Gewichtes erwartet. Naheliegender wäre sicherlich auch die Hydromotor-Generator Einheit am unteren Ende des Mastes anzuordnen. Untersuchungen hierzu haben aber gezeigt, daß durch das hohe Gewicht der Leitungen keine Verringerung des Gondel Gewichtes möglich ist.

Die Zuverlässigkeit eines solchen Systems kann nur bedingt im Vorfeld beurteilt werden. Große Mehrhubmotoren wie sie in der Industrie üblich sind, werden typischerweise auf 40.000 Stunden unter Vollast ausgelegt. So werden zum Beispiel die großen Mehrhubmotoren der Firma MacTaggart Scott auf Lebenszeit in U-Boote eingeschweißt. Dennoch kann davon ausgegangen werden, dass bei einem solch radikal neuen Konzept noch vieles auf dem Weg zur zuverlässigen Maschine erforscht und entwickelt werden muss. Artemis Intelligent Power Ltd stellt derzeit ein Team von Ingenieuren zusammen um sich dieser Herausforderung zu stellen.

Für Weitere Information wenden Sie sich bitte an:

Dr. Uwe Stein
Artemis Intelligent Power
u.stein@artemisip.com
0044 (0)131 516 8151