

SEPDIS™ – système sous-marin de distribution d'énergie électrique

Nils Arne Sølvi, Jan Ove Gjerde, Trond Skullerud

Contrairement aux systèmes offshore de première génération conçus pour fonctionner sur des plates-formes situées à proximité des têtes de puits, les systèmes de deuxième génération aujourd'hui mis en place sont basés sur des supports flottants de production, stockage et déchargement FPSO (*Floating Production, Storage and Offloading*), et utilisent des installations de surface raccordées aux puits sous-marins par des ombilicaux. Ces supports flottants réalisent le pompage polyphasique, la séparation, l'injection d'eau et le stockage du pétrole brut. La prochaine génération d'équipements de production ira encore plus loin et réalisera toutes ces tâches sur les fonds marins. Ces équipements devront être alimentés en énergie électrique par des systèmes fiables et économiques conçus pour fonctionner en environnement sous-marin.

L'industrie du pétrole et du gaz continue d'investir massivement dans des solutions économiques et rentables de développement des champs. Au cours des 10 à 15 dernières années, des millions de dollars ont été consacrés au développement de nouveaux outils de production, d'amélioration et de traitement [1]. ABB, un des leaders du secteur parapétrolier, est à l'origine d'innovations technologiques qui permettent de tirer tout le potentiel de ces nouveaux outils de production pétrolière et gazière sous-marine.

Plus récemment, les opérateurs pétroliers ont également porté leur attention sur les auxiliaires et autres dispositifs indispensables pour réaliser des systèmes de production pétroliers et gaziers sous-marins plus économiques et plus flexibles. Dans ce contexte, le marché s'intéresse de près aux systèmes sous-marins de transport, distribution et contrôle-commande de l'énergie électrique dans la gamme des megawatt. C'est pour répondre à cette attente qu'ABB a décidé le développement du système SEPDIS™ de distribution sous-marine d'énergie électrique [1].

Le système SEPDIS est conçu pour l'alimentation en énergie électrique par un câble unique de l'ensemble des équipements d'un site sous-marin (contrairement à ce qui se fait actuellement avec des câbles individuels qui alimentent séparément chaque charge sous-marine). Ainsi, le système SEPDIS constitue une solution plus proche des solutions actuellement mises en œuvre pour les applications à terre. Parmi les autres avantages du concept SEPDIS, nous citerons: une flexibilité accrue concernant la distance entre l'alimentation et la charge, et le nombre de charges; les extensions graduelles du système et les solutions pour les problèmes fondamentaux associés aux harmoniques et aux démarrages des gros moteurs.

SEPDIS:

un projet multipartenaire

AS Norske Shell, STATOIL, Norsk Hydro ASA, Mobil Exploration Norway Inc (Exxon/Mobil), Saga Petroleum ASA (Norsk Hydro ASA), FRAMO Engineering AS et ABB sont les partenaires du projet SEPDIS lancé début 1997, avec pour

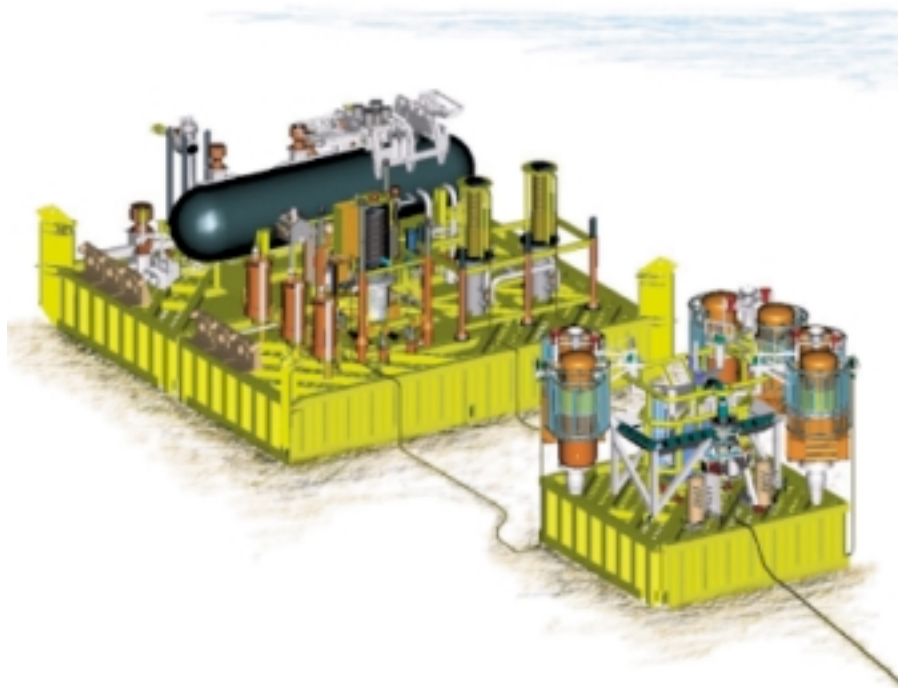
objectif le développement d'un système sous-marin de distribution d'énergie électrique. ABB assure le rôle de chef de projet SEPDIS et a constitué une équipe de spécialistes du Groupe ABB chargée de l'étude et du développement des composants/systèmes électriques et mécaniques sous-marins.

Outre leur support financier, les entreprises pétrolières ont également contribué au projet en fournissant de précieuses informations techniques et commerciales. Cette contribution permet de s'assurer que le système SEPDIS répond aux besoins du marché et des clients.

Le projet comporte cinq phases, illustrées en [2]:

- Développement du concept
- Développement et conception du système
- Construction du prototype
- Essais de qualification du prototype
- Essais du système prototype

Les trois premières phases sont maintenant terminées et doivent à présent être validées par les essais de qualification et les essais sur le système prototype.



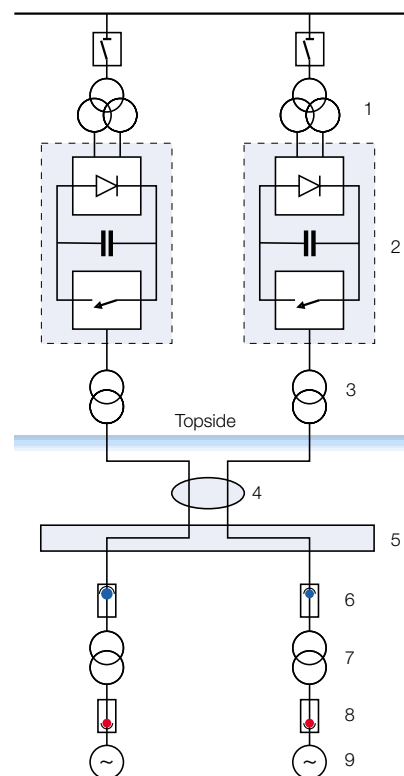
1 Vue générale d'une installation SEPDIS™, juxtaposée à un système de séparation et d'injection sous-marin SUBSIS (gauche)

Équipement électrique de surface

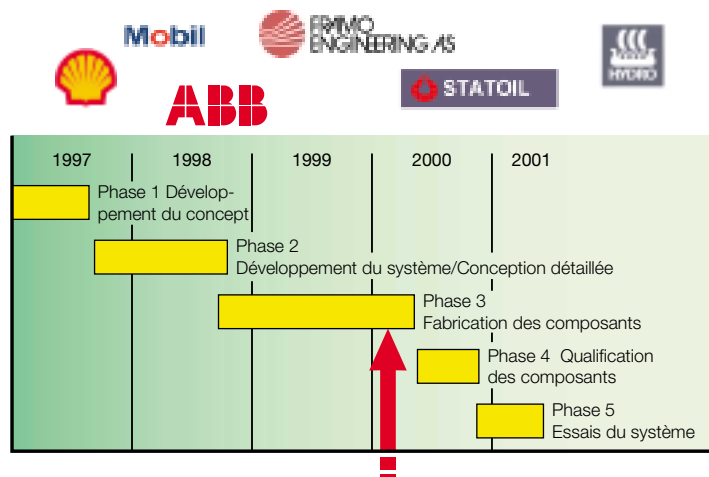
L'équipement électrique de surface **3** ressemble beaucoup à un système d'entraînement de puissance à vitesse variable classique avec, toutefois, des câbles moteur très longs et des transformateurs élévateurs. Chaque charge est alimentée individuellement par un convertisseur statique de fréquence raccordé via un câble électrique sous-marin.

Les transformateurs élévateurs augmentent la tension de sortie du convertisseur de fréquence transmise sur le câble; lorsque la distance entre le convertisseur et la charge est supérieure à 5–10 km, un transformateur sous-marin est, cependant, obligatoire.

Les transformateurs à trois enroulements abaissent la tension réseau à un niveau correspondant aux convertisseurs statiques de fréquence. Les trois enroulements permettent le



2 Sociétés participantes au projet SEPDIS et état d'avancement des travaux



3 Schéma de principe d'un système d'alimentation électrique de surface

- 1 Transformateur abaisseur
- 2 Convertisseur statique de fréquence
- 3 Transformateur élévateur
- 4 Câble électrique sous-marin en faisceau
- 5 Extrémités de câbles sous-marins
- 6 Connecteur HT sous-marin
- 7 Transformateur abaisseur sous-marin
- 8 Connecteur de moteur de pompe opérationnel sous l'eau
- 9 Moteur c.a. de pompe

redressement à un indice de pulsation égal 12 et réduisent donc les harmoniques injectées sur le réseau.

Les convertisseurs statiques de fréquence utilisés sont des modèles ABB standard, à semi-conducteurs IGBT pour les applications basse tension ou à semi-conducteurs IGCT pour les applications moyenne tension. Leurs valeurs assignées sont normalement très supérieures à celles de la charge du fait des grandes longueurs de câbles moteur et des caractéristiques spéciales des charges.

Les transformateurs élévateurs sont spécifiquement conçus pour fonctionner avec les systèmes d'entraînement à vitesse variable et offrent une densité de flux élevée aux basses fréquences. Lorsque les charges sont placées à de grandes distances, un transformateur sous-marin s'impose pour des tensions supérieures à 6,6 kV. Les moteurs sont normalement isolés pour des niveaux de tension de 12 kV et fonctionnent à 6,6 kV.

Des connecteurs haute tension spéciaux sont nécessaires pour le branchement/débranchement sous l'eau du câble électrique sous-marin au moteur de la pompe et/ou au transformateur sous-marin.

Conception technique

La conception du système de distribution électrique de surface relève certains défis techniques, notamment réduction de l'encombrement et de la masse des éléments constitutifs, et maîtrise du couple initial de démarrage de la pompe sous-marine.

Les systèmes d'entraînement de surface avec des câbles moteur très longs exigent une conception particulière du fait des phénomènes de résonance du réseau. Ceux-ci se produisent lorsque les harmoniques engendrées par le convertisseur statique de fréquence excitent les fréquences de résonance du réseau en aval du convertisseur. Ces phénomènes peuvent être supprimés par le contrôle actif de la fréquence

Tableau 1: SEPDIS™ en bref

Spécifications du système SEPDIS	
Charge totale	10 – 20 MVA
Longueur du câble électrique	0 – 100 km
Nombre de charges	2 – 20
Tension de transport	11 – 33 kV
Tension de distribution	3,3 – 12 kV
Profondeur de conception	2000 m
Installation	Par piliers de guidage
Intervention	Engin léger, modulaire

de commutation du convertisseur, de sorte que les fréquences de commutation qui engendrent un gain de tension > 1 sont évitées. Autre possibilité: la «compensation du réseau» par filtrage, c'est-à-dire le contrôle de l'impédance du réseau.

Un autre critère de conception est le couple initial de démarrage de la pompe qui a un impact sur la densité de flux du transformateur élévateur, le temps de démarrage et le courant admissible du convertisseur.

Système SEPDIS

Du point de vue électrique, SEPDIS est un système classique de transport et de distribution d'énergie électrique avec un nombre limité de composants et de fonctions. Du point de vue mécanique, cependant, et en termes de fonctionnalité sous-marine, il s'agit d'un système robuste et très élaboré. La topologie du sous-système d'entraînement à vitesse variable s'apparente à celle d'un système d'entraînement traditionnel avec transformateur à trois enroulements, redresseur avec un indice de pulsation égal à 12, circuit c.c., onduleur et filtre de sortie. Alors que l'équipe du projet choisit de recourir, chaque fois que cela était possible, à une technologie éprouvée et fiabilisée, d'importants travaux de développement furent nécessaires dans certains domaines, notamment le refroidissement, la conception mécanique, ainsi que la fiabilité et la compatibilité des matériaux.

SEPDIS est né de l'idée de déplacer le poste de distribution sur le fond marin afin de pouvoir transporter l'énergie électrique par un câble HT et situer le système de distribution à proximité des charges. Ceci permet de réduire les pertes de puissance, le nombre de câbles sous-marins, ainsi que l'encombrement et la masse des installations en surface. On évite également le démarrage en charge des moteurs avec des câbles de grandes longueurs et on limite fortement les problèmes d'harmoniques et les phénomènes de résonance.

Le système de transport comporte un disjoncteur de travée et un transformateur élévateur – tous les deux de conception traditionnelle et localisés en surface – et le câble d'énergie électrique sous-marin. Les tensions de service types pour la liaison électrique se situent entre 11 et 33 kV, en fonction de la charge totale et de la distance jusqu'aux charges. Les facteurs de limitation sont le connecteur sous-marin opérationnel sous l'eau ainsi que les systèmes d'extrémités et de traversées de câbles actuellement qualifiés pour une isolation de classe 12 kV.

Le transformateur abaisseur sous-marin principal assure l'interface entre le câble HT et le poste de distribution. Ce dernier est intégré au module transformateur sous-marin et comporte un jeu de barres unique avec raccordement à chaque branche de charge. En général, les charges sont des pompes centrifuges sous-marines, entraînées par des moteurs asyn-

chrones à huile. La puissance maximale pour ces pompes étant actuellement de 3 MW, l'entraînement est dimensionné pour cette puissance. La tension de service type au niveau du poste de distribution sous-marine se situe entre 3,3 et 6,6 kV (*Tableau 1*).

Une architecture modulaire

Outre le disjoncteur de travée et le transformateur élévateur de surface, les principaux éléments constitutifs du système SEPDIS sont les suivants, illustrés en **4** :

- Connecteur HT opérationnel sous l'eau (MECON [2]), système d'extrémités et de traversées de câbles
- Transformateur abaisseur et poste de distribution sous-marins
- Connecteurs opérationnels sous l'eau du poste de distribution
- Modules convertisseurs de fréquence sous-marins, incluant disjoncteur de protection

et interface du système de contrôle-commande

- Système de contrôle-commande de SEPDIS
- Bâti, matériel et outils d'installation et d'intervention

Bâti

Le bâti **5** est basé sur le concept de production de système modulaire sous-marin d'ABB. Ce système flexible avec porte-piliers de guidage peut également être installé par un puits central (bassin d'installation avec accès direct à la mer à partir du pont du navire ou de la plate-forme de forage). Quelques modifications ont été apportées à la structure de base pour pouvoir accueillir le système SEPDIS.

Trois types de fondation différents sont proposés pour le bâti : jupe, ancre à succion et pilotis unique. La structure de fondation sert principalement de support au bâti d'acier pendant l'installation et l'exploitation.

Le bâti d'acier mesure 6 × 5,5 m (pour un

concept à 4 fentes) et comporte sous sa partie centrale un dispositif d'attache circulaire pour sa fixation au support de fondation sur le fond marin à ancre à succion ou à pilotis unique.

Un cadre-support rectangulaire au centre du bâti est destiné à recevoir le module transformateur. Les piliers de guidage soudés aux quatre coins du bâti assurent le bon positionnement (en hauteur et sur le plan horizontal) du module transformateur, garantissant le bon alignement des points de couplage entre le transformateur et les modules d'alimentation en énergie.

Chaque bâti peut comporter jusqu'à cinq porte-piliers de guidage qui simplifient l'installation et supportent également le poids des piliers de guidage et de l'unité d'alimentation en énergie pendant l'exploitation.

Les piliers de guidage, en forme de tiges d'acier, garantissent également le maintien et le bon alignement du module convertisseur de fréquence, du départ-moteur, des modules d'alimentation auxiliaires, etc.

4 Principaux éléments constitutifs du système SEPDIS



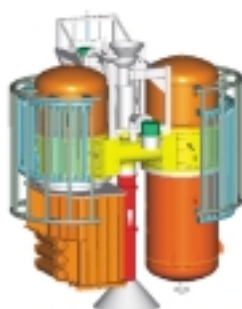
Bâti & matériel d'installation



Connecteur HT opérationnel sous l'eau



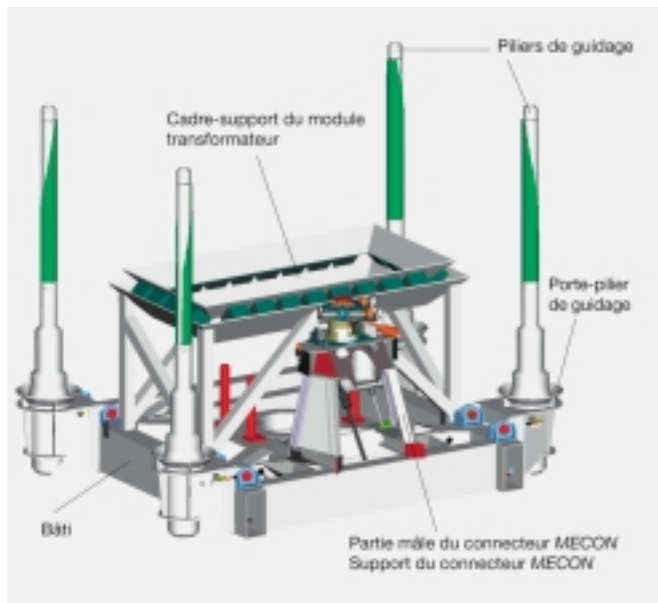
Système SEPDIS



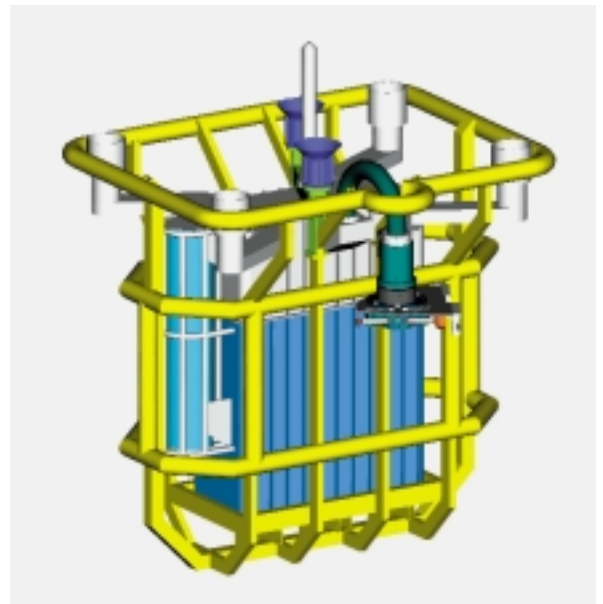
Convertisseur de fréquence sous-marin avec disjoncteur



Transformateur sous-marin



5 Structure d'un bâti de fond avec quatre piliers de guidage



6 Module transformateur de puissance sous-marin

Module transformateur sous-marin

Les principaux éléments constitutifs du module transformateur sous-marin 6 sont:

- Transformateur sous-marin principal
- Réservoir d'expansion
- Traversée haute tension (partie mâle supérieure du connecteur MECON DS)
- Traversées sous-marines du poste de distribution (parties mâles inférieures des connecteurs MECON NM)
- Structure de protection
- Guides et entonnoirs pour l'installation/la récupération

Le noyau et les enroulements du transformateur, de même que le jeu de barres intégré sont logés dans une cuve d'acier remplie d'huile. Le volume de la cuve est compensé par des systèmes interne et externe, et le refroidissement se fait par convection naturelle avec l'eau du milieu environnant.

Le raccordement au câble électrique se fait par l'intermédiaire d'un connecteur MECON, dont une des pièces mâles est déjà fixée au module transformateur (ligne du transformateur HT). Les connecteurs de distribution opération-

nels sous l'eau sont utilisés entre le poste de distribution (transformateur) et les branches des charges. Outre le câble d'énergie électrique, le SEPDIS comprend un système de contrôle de la température et de la pression à l'intérieur du module. Celui-ci communique avec le poste de distribution sous-marin via des câbles de commande et des connecteurs standards de commande opérationnels sous l'eau avec un engin sous-marin télécommandé.

Module convertisseur de fréquence sous-marin

Le module convertisseur de fréquence sous-marin est raccordé au transformateur sous-marin principal par des connecteurs et des câbles.

Ce module 7 comprend les éléments suivants:

- Connecteurs et traversées de distribution sous-marins
- Disjoncteur de protection
- Transformateur à trois enroulements
- Convertisseur de fréquence
- Système de refroidissement
- Récipient sous pression
- Système de contrôle

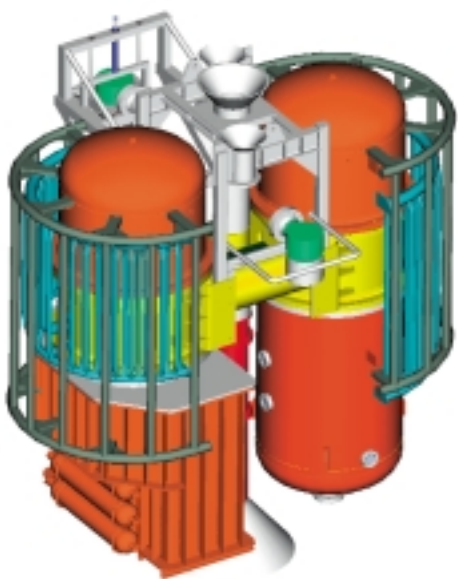
- Système de pose, guides, outils de verrouillage et de pose

Le transformateur à trois enroulements est enfermé dans une cuve remplie d'huile et à compensation de pression. L'huile joue le double rôle d'agent isolant et d'agent de refroidissement. Un récipient sous pression de 1 bar contient le reste du module, y compris l'électronique de puissance, les condensateurs, etc. Le système de refroidissement du convertisseur est de type passif, ne nécessitant ni ventilateur, ni pompe.

Le système de contrôle-commande et de supervision du module complet, y compris les fonctions intégrées de protection du moteur, est basé sur une technologie standard. De conception particulièrement fiable, il inclut sa propre alimentation autonome qui le met sous tension avant les circuits haute tension.

SEPDIS – Les défis techniques

Un projet aussi ambitieux que SEPDIS représente de nombreux défis techniques: un réseau d'alimentation électrique sous-marin doit offrir une fiabilité et une disponibilité élevées, tout en garantissant robustesse et compacité indispensables pour contenir les coûts d'intervention et



7 Convertisseur statique de fréquence sous-marin avec réservoir sous-pression

d'installation. Les défis techniques du point de vue électrique concernent les harmoniques et les surtensions, de même que les contraintes supplémentaires imposées aux câbles électriques par les phénomènes de réflexions. Du point de vue mécanique, le refroidissement et l'encapsulation constituaient des problèmes spécifiques.

Transformateur de surface

Les valeurs assignées du transformateur en couplage triangle-étoile sont fonction de la puissance totale requise par les charges sous-marines. Des prises sont fournies pour compenser les variations de tensions provoquées par les fluctuations de consommation, plus particulièrement lors des démarrages directs des gros moteurs asynchrones.

Le point neutre (côté secondaire) est mis à la terre via une bobine de Petersen pour réduire les surtensions pouvant être provoquées par un défaut de terre sur une phase du câble électrique.

Câble de puissance

Un câble haute tension (11–33 kV) présente des avantages en termes de dimensions, de

coût, de chutes de tension et de pertes de puissance.

La longueur du câble électrique varie selon la distance entre les installations en surface et les charges (y compris la profondeur de l'eau). Cette longueur est un facteur décisif car elle a une incidence sur les réflexions, les oscillations et les surtensions.

Transformateur de distribution sous-marin

A l'extrémité du câble électrique, on trouve un transformateur abaisseur en couplage triangle-étoile qui abaisse la tension à un niveau de distribution sous-marin adéquat. Les valeurs assignées du transformateur sont déterminées par les besoins en puissance des charges. Le transformateur de distribution est mis à la terre au niveau du poste de distribution via une résistance pour garantir un courant de défaut détectable à charge minimale.

Moteurs HT

Avec le système SEPDIS, de gros moteurs asynchrones peuvent être directement raccordés au poste de distribution sous-marin. Lors du démar-

rage direct de ces moteurs, le courant réactif prélevé sur le réseau peut atteindre quatre à six fois le courant nominal de la charge à la tension assignée du moteur.

Dans ce cas précis, la compensation de la puissance réactive, tout en étant indispensable pour démarrer les moteurs asynchrones, peut également avoir des effets néfastes sur les autres charges raccordées au réseau (la tension peut être trop faible).

Charges BT supplémentaires

Au besoin, des charges basse tension (BT) supplémentaires peuvent être connectées au poste de distribution sous-marin via un transformateur. On suppose que ces charges seront en mesure de fonctionner normalement au sein du système SEPDIS, même lors d'importants écarts de tension.

Convertisseur de fréquence sous-marin

Les dispositifs à électronique de puissance, comme les redresseurs et les convertisseurs, sont des sources communes d'harmoniques. Les différentes harmoniques peuvent être présentes dans le réseau électrique. Chaque harmonique se propage en fonction de l'impédance du réseau à la fréquence correspondante. Avec le système SEPDIS, plusieurs systèmes d'entraînement peuvent être raccordés au jeu de barres commun de distribution.

La teneur en harmoniques de la tension détermine, pour une large part, la qualité de l'alimentation électrique. En effet, les composants du réseau sont construits pour fonctionner à la fréquence réseau de 50 ou 60 Hz, et les harmoniques provoquent normalement un échauffement et imposent des contraintes électriques

supplémentaires aux composants raccordés au réseau. Des harmoniques sont engendrées dans les réseaux du fait des caractéristiques non linéaires des charges raccordées. Les caractéristiques de chaque système d'entraînement peuvent être identifiées par analyse ou mesure.

Le convertisseur de fréquence sous-marin de 3 MVA est l'élément clé du système SEPDIS. Basé sur le concept du nouveau convertisseur de fréquence ACS 1000 d'ABB [3], il permet la commande et le réglage individuels du couple, de la puissance active et de la vitesse des moteurs.

Les convertisseurs de la série ACS 1000 sont disponibles pour des tensions de 2,3 à 4,16 kV et des puissances de 0,4 à 5,95 MVA. Il s'agit de convertisseurs de fréquence alliant performances supérieures et fiabilité accrue dans un encombrement au sol plus faible et une hauteur réduite.

La configuration du système SEPDIS pour les eaux profondes inclut un réservoir sous pression très épais, limitant le transfert de chaleur par les parois. Comme nous l'avons déjà précisé, un système de refroidissement passif, sans ventilateur ni pompe, contribue à la fiabilité. Il s'agit d'un système à cycle thermique dans lequel les composants générateurs de chaleur sont placés dans un liquide de refroidissement avec un point d'ébullition relativement bas; la vapeur passe à l'extérieur de la cuve, où l'eau de mer la refroidit et la condense avant son retour dans le réservoir sous pression.

D'importantes modifications à la conception du produit existant sont nécessaires du fait des contraintes spécifiques au milieu sous-marin.

Les entraînements à vitesse variable engendrant des harmoniques de tension et de courant, une analyse fréquentielle est réalisée pour caractériser le comportement du réseau électrique et identifier les fréquences critiques que les systèmes d'entraînement ne doivent pas produire, réduisant ainsi les risques de détérioration des équipements raccordés au réseau.

Il est également indispensable d'étudier la caractéristique de l'impédance du réseau d'alimentation en fonction de la fréquence avant de sélectionner la technique de modulation du convertisseur. Une modélisation détaillée de chaque composant du réseau est requise, qui doit inclure un modèle à paramètres distribués du câble électrique.

Perspectives

Ensemble, le système sous-marin de séparation et d'injection (SUBSIS) [1] et le système de distribution sous-marin SEPDIS marquent l'avènement d'une nouvelle ère dans le domaine de la production pétrolière et gazière, et annoncent également la remise en cause de nombreux supports flottants et plates-formes de grandes dimensions.

Les besoins en énergie électrique des charges sous-marines augmenteront avec l'avènement des nouvelles solutions d'exploitation. ABB développe de nouvelles solutions courant

continu (c.c.) et courant alternatif (c.a.) qui permettront à l'industrie de l'offshore de répondre aux défis du toujours plus puissant, toujours plus loin et toujours plus profond.

Basée sur le concept SEPDIS, la faisabilité d'une solution technique a été identifiée pour les grandes distances (150 km) avec un niveau de puissance maximal d'environ 40 MW. Cette solution, qui pourrait être utilisée pour une alimentation en énergie électrique à partir de la côte ou d'une infrastructure à distance existante, sera examinée dans le cadre du projet actuel SEPDIS. Des campagnes supplémentaires de qualification et d'essais sont nécessaires pour les connecteurs et les pénérateurs haute tension (> 36 kV).

Adresses des auteurs

Nils Arne Sølvik
ABB Offshore Systems AS
NO-1361 Billingstad
Norvège
nils.solvik@no.abb.com
Fax: +47 668 445 45

Jan Ove Gjerde
Trond Skullerud
ABB Corporate Research AS
NO-1361 Billingstad
Norvège
jan.o.gjerde@no.abb.com
trond.skullerud@no.abb.com
Fax: +47 668 445 88

Bibliographie

- [1] **R. Strömquist; S. Gustafson:** SUBSIS – le premier système de séparation et d'injection sous-marin du monde. Revue ABB 6/98, 4–13.
- [2] **I. Østergaard; G. Sande; A. Nysveen; F. Greuter:** MECON – un nouveau connecteur haute tension sous-marin. Revue ABB 3/99, 37–42.
- [3] **S. Malik; D. Kluge:** ACS 1000 – le premier entraînement CA standard pour applications moyenne tension. Revue ABB 2/98, 4–11.
- [4] **Rolf Ove Råd:** Converter fed sub sea motor drives. PhD Thesis, Norwegian Institute of Technology, 1995.