

	PROGETTO NEMO ALLEGATO: POTENZA ELETTRICA, SISTEMA DI TRASFERIMENTO E DISTRIBUZIONE SUL FONDO	Data creazione 25-10-2001 15:22 Pagina 1 di 55 ALL-Distr_potenza-Rev-A.doc Rev:A
---	---	---

ALLEGATO TECNICO

POTENZA ELETTRICA. SISTEMA DI TRASFERIMENTO E DISTRIBUZIONE SUL FONDO.

Rev.	Descrizione	Preparato	Controllato	Approvato	Data
A	Divulgazione Interna	M. Sedita			

	PROGETTO NEMO ALLEGATO: POTENZA ELETTRICA, SISTEMA DI TRASFERIMENTO E DISTRIBUZIONE SUL FONDO	Data creazione 25-10-2001 15:22 Pagina 2 di 55 ALL-Distr_potenza-Rev-A.doc Rev:A
---	---	---

Potenza Elettrica. Sistema di trasferimento e distribuzione sul fondo.

1. Introduzione

La progettazione e la realizzazione del cavo principale per il progetto Nemo rappresenta probabilmente una significativa sfida tecnologica.

Le attuali realizzazioni di cavi elettro-ottici sottomarini vengono utilizzate soprattutto nel settore delle telecomunicazioni. Si mostrerà in questo documento che queste realizzazioni non soddisfano i requisiti necessari al progetto Nemo.

Gli aspetti meccanici, dal punto di vista progettuale del cavo, devono essere attentamente presi in considerazione a causa dell'alta profondità operativa del progetto, circa 3.500 m.

Questo documento vuole focalizzare l'attenzione sugli aspetti di trasmissione elettrica e distribuzione elettrica per la progettazione del cavo e della rete di distribuzione. La scelta AC o DC come sistema di trasmissione sarà discussa.

Inoltre per poter prendere una decisione qualificata su quale sistema di potenza bisogna implementare per il progetto Nemo, è necessario effettuare una valutazione dell'intero sistema di potenza. Oltre al cavo per il trasferimento della potenza è necessario effettuare una valutazione dei dispositivi come convertitori, rettificatori, trasformatori, connettori, dispositivi elettronici, relativo sistema di controllo etc.

In funzione della scelta AC o DC differenti elementi possono essere inclusi. Inoltre è necessario effettuare un'analisi del sistema di potenza dove vengano inclusi diversi fattori come livelli di tensione e di corrente, stabilità di tensione operativa, capacità ai cortocircuiti etc.

Sulla base di quanto detto sopra questo documento si focalizza principalmente sulle considerazioni effettuate per la realizzazione del cavo elettro-ottico principale e della

	PROGETTO NEMO ALLEGATO: POTENZA ELETTRICA, SISTEMA DI TRASFERIMENTO E DISTRIBUZIONE SUL FONDO	Data creazione 25-10-2001 15:22 Pagina 3 di 55 ALL-Distr_potenza-Rev-A.doc Rev:A
---	---	---

rete di distribuzione sottomarina. Gli altri aspetti, non essendo ancora tutti ben definiti, vengono citati come architettura generale del sistema

Attualmente, in ogni caso, non esistono sistemi preesistenti la cui complessità sia paragonabile al progetto Nemo e a cui si possa fare riferimento. Pertanto le scelte saranno fatte sulla base di considerazioni che porteranno a soluzioni ingegneristiche che al momento attuale sono realistiche.

1 Esempi di Osservatori sottomarini esistenti

Negli ultimi anni sono stati installati, nel mondo, un certo numero di osservatori sottomarini con connessione tramite cavi sottomarini. Le maggiori applicazioni in questo settore sono dovute a studi riguardanti il settore della Geologia. Per esempio esistono più di 5 sistemi cablati in fibra ottica, con lunghezze da 100 a 200 km con strumentazione sismica installati attorno alle coste Giapponesi realizzati negli ultimi 5 anni. Un osservatorio cablati in fibra ottica denominato LEO-15 (<http://marine.rutgers.edu/mrs/LEO-15.html> e <http://adcp.whoi.edu/LEO15/index.html>) è stato realizzato, in acque basse, nel 1997 nel New Jersey (USA). Una seconda installazione in acque basse denominata KATAMA è prevista per la fine del 2000 (http://adcp.whoi.edu/MV_OBSERVATORY/index.html). Tra la costa della California e le isole Hawaii, ad una profondità di 5000 m, è stata installata una Junction box, su un cavo sottomarino per telecomunicazioni in disuso, <http://www.whoi.edu/science/GG/DSO/H2O/>

Attualmente è in fase di realizzazione l'esperimento Antares <http://antares2.in2p3.fr/>

Questo esperimento si propone di realizzare un dimostratore per la realizzazione di un rivelatore di neutrini, con distanza dalla costa di circa 40 km.

E' attualmente in fase di R&D l'esperimento "Neptun" che prevede la realizzazione di una rete in fibra ottica, con uno sviluppo complessivo pari a 3.000 km, per la

	PROGETTO NEMO ALLEGATO: POTENZA ELETTRICA, SISTEMA DI TRASFERIMENTO E DISTRIBUZIONE SUL FONDO	Data creazione 25-10-2001 15:22 Pagina 4 di 55 ALL-Distr_potenza-Rev-A.doc Rev:A
---	---	---

realizzazione di un laboratorio sottomarino interdisciplinare (<http://www.ocean.washington.edu/neptune/>).

3 Livelli di Tensione e di Corrente

Il limite attuale su un cavo per telecomunicazioni per la trasmissione di potenza è di 10 kV e inoltre il mercato non richiede correnti, per queste applicazioni, superiori a 1 A, pertanto la potenza massima trasmissibile è di 10 kW.

Il fabbisogno di potenza elettrica per il progetto Nemo è stato stimato in circa 80 kW al carico.

Pertanto sulla scorta di queste considerazioni si rende necessario progettare un cavo con caratteristiche adeguate tenendo conto di tre fattori:

- Un elevato valore di corrente può causare un surriscaldamento del cavo. Questo potrebbe provocare una bruciatura dell'isolamento
- Se il cavo, durante le operazioni di posa, è sospeso fra due punti, un suo riscaldamento, potrebbe provocare una flessione del cavo stesso con conseguente flessione delle strutture di sostegno
- Se la lunghezza del cavo è elevata, la caduta di tensione tra il generatore e il carico può essere eccessiva, anche lavorando al disotto dei limiti di riscaldamento del cavo

In ogni caso il fattore termico, anche in condizioni non disastrose, è un fattore importante da tenere in considerazione, per non ridurre la vita dell'isolamento del cavo.

Sfortunatamente non sono disponibili dati che caratterizzano le performance termiche dell'isolamento del cavo. Anche se conosciamo la conducibilità termica e potremmo stimare la temperatura interna, non sapremmo come varia la vita del cavo in funzione della temperatura.

	PROGETTO NEMO ALLEGATO: POTENZA ELETTRICA, SISTEMA DI TRASFERIMENTO E DISTRIBUZIONE SUL FONDO	Data creazione 25-10-2001 15:22 Pagina 5 di 55 ALL-Distr_potenza-Rev-A.doc Rev:A
---	---	---

Ricorrendo a calcoli matematici si assume spesso che la degradazione con la temperatura è causata da meccanismi il cui valore di velocità di crescita è descritto dall'equazione di Arrhenius, utilizzata per studiare processi fisici e chimici:

$$R = R_0 e^{-E_A/kT}$$

Dove R_0 è una costante

E_A è l'energia termica di attivazione espressa in electron volt

k è la costante di Boltzmann 1.38×10^{-23} J/K o 8.6×10^{-5} eV/K

T è la temperatura in gradi Kelvin

In test di accelerazioni di durata, il fattore di accelerazione F che determina la velocità di danneggiamento è definito come:

$$F = \frac{X_1}{X_2} = \exp\left(\frac{E_A}{k} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)\right)$$

Questo metodo consente, ad esempio, di determinare in un semiconduttore al silicio la velocità con cui degrada. Con una energia di attivazione termica di 1 eV, un incremento in temperatura operativa da 135° a 165° potrebbe corrispondere a un incremento di un fattore dieci di velocità di danneggiamento. Temperature di 207° possono portare a incrementi di un centinaio di volte della velocità di danneggiamento. Studi successivi sono necessari per trovare i corrispondenti valori d'isolamento dei cavi sottomarini.

Si può essere confortati dal fatto che il cavo è immerso in un liquido raffreddato e se noi adottiamo gli stessi standard utilizzati per conduttori in rame posti in aria certamente si

	PROGETTO NEMO ALLEGATO: POTENZA ELETTRICA, SISTEMA DI TRASFERIMENTO E DISTRIBUZIONE SUL FONDO	Data creazione 25-10-2001 15:22 Pagina 6 di 55 ALL-Distr_potenza-Rev-A.doc Rev:A
---	---	---

può arrivare a stime conservative. Il problema quindi è di trovare la sezione adeguata del cavo.

Dai dati pubblicati dai produttori si sa che la resistenza serie di un cavo è normalmente sotto 1.5 Ω /km. Assumendo che la conducibilità del cavo possa essere paragonata ad un cavo dello standard AWG #6 che ha circa 1.35 Ω /km con diametro totale di 4.7 mm. I dati indicano per un cavo #6 che a 60 Hz in aria libera un singolo conduttore può trasportare una corrente di 100A.

Di conseguenza il conduttore centrale di un cavo sottomarino è in grado di sostenere una corrente di 100 A.

Ma a 100 A, la caduta di tensione su 100 km di cavo è circa 15 kV, che può eccedere la tensione di breakdown dell'isolamento del cavo. Tenendo in considerazione che per una potenza di circa 50 kW, avremmo una tensione di caduta di circa 7.5 kV. Da quanto detto precedentemente, circa lo stress del cavo, questo valore sembra ancora elevato quindi, per tale ragione, il sistema proposto si baserà sull'utilizzo di un cavo per il trasporto di energia progettato per tale scopo e includerà le necessarie fibre ottiche per la trasmissione dei dati.

4 Sistema trifase in AC

Il modo convenzionale di trasmissione della potenza elettrica in uso è l'AC. L'eccezione è rappresentata solo dai sistemi di trasferimento per grandi potenze su lunghe distanze.

Considerando il relativo basso livello di potenza di trasferimento di potenza richiesto è verosimile che un sistema in AC possa essere preso in considerazione. Per determinare la miglior soluzione progettuale è necessario effettuare un'analisi completa del sistema di potenza, dove vengano inclusi fattori come livelli di tensione e corrente, stabilità di tensione etc.

	PROGETTO NEMO ALLEGATO: POTENZA ELETTRICA, SISTEMA DI TRASFERIMENTO E DISTRIBUZIONE SUL FONDO	Data creazione 25-10-2001 15:22 Pagina 7 di 55 ALL-Distr_potenza-Rev-A.doc Rev:A
---	---	---

4.1 Progettazione di un cavo in AC

Nel caso di un sistema in AC è preferibile l'uso di polietilene come materiale di isolamento elettrico. La ragione consiste nel fatto che il PE è un materiale in cui le caratteristiche di isolamento sono ormai ben collaudate e le cui proprietà nel lungo tempo sono ben conosciute. In questo progetto non è necessario ricorrere all'uso di polietilene crosslinked (XLPE) in quanto la temperatura di esercizio del cavo sarà sotto la temperatura operativa del PE (70°C).

Sotto sono riportati due differenti soluzioni progettuali rispetto alle perdite e alla caduta di tensione sul cavo; la prima dove la sezione del conduttore è considerata la più bassa possibile e l'altra dove le perdite sono ridotte al minimo. Bisogna considerare che queste simulazioni non tengono conto dell'intero sistema di potenza che potrebbero modificare i risultati.

I calcoli mostrati di seguito tengono conto che il fattore di potenza del carico è 1 ($\cos \varphi = 1$).

Nella pratica il fattore di potenza sarà inferiore a 1 e questo determinerà un incremento delle perdite se comparate all'analisi effettuata di seguito.

3.2 Ipotesi 1: cavo 3x25mm²

Questo cavo è equipaggiato da 3 conduttori da 25mm² con un isolamento di spessore di 2.15mm (PE). Lo schema è mostrato in Fig. 1.

	PROGETTO NEMO ALLEGATO: POTENZA ELETTRICA, SISTEMA DI TRASFERIMENTO E DISTRIBUZIONE SUL FONDO	Data creazione 25-10-2001 15:22 Pagina 8 di 55 ALL-Distr_potenza-Rev-A.doc Rev:A
---	---	---

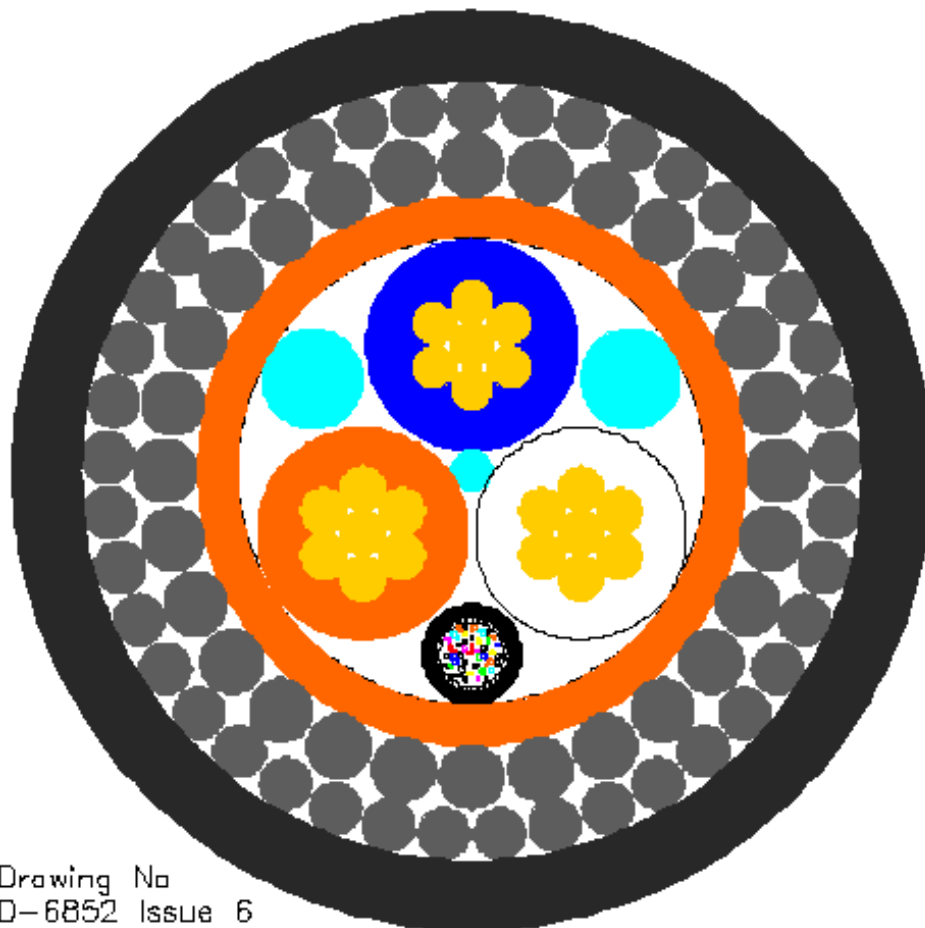


Figura 1. 3-Fasi AC Cavo, $3 \times 25 \text{ mm}^2$.

La tabella 1 mostra il dimensionamento del cavo e il risultato approssimato dei calcoli di caduta di tensione e delle perdite per alimentare un carico di 80kW ($\cos \varphi = 1$).

	PROGETTO NEMO ALLEGATO: POTENZA ELETTRICA, SISTEMA DI TRASFERIMENTO E DISTRIBUZIONE SUL FONDO	Data creazione 25-10-2001 15:22 Pagina 9 di 55 ALL-Distr_potenza-Rev-A.doc Rev:A
---	---	--

Tabella 1. Dati approssimati delle dimensioni, caduta di tensione sul cavo e perdite sul cavo 3x25mm².

Proprietà	Unità	Valore
Diametro Esterno	mm	46
Peso in Aria	kg/m	5.4
Perdita di Potenza	kW	150
Caduta di Tensione	kV	3.5
Tensione di Alimentazione	kV	5.5

I risultati ottenuti mostrano un alto valore di perdite nella potenza di trasmissione; il generatore dovrà erogare 230 kW di potenza per trasmettere 80 kW al carico. Questo implica un alto spreco di energia che si tramuta in elevati costi di energia elettrica. Per ottenere una tensione al carico di 2 kV, la tensione del generatore dovrà essere approssimativamente 5.5 kV. A causa dell'alto valore di tensione di alimentazione lo spessore dell'isolamento del cavo dovrebbe essere incrementato approssimativamente a 2.5 mm. Inoltre dal punto di vista della stabilità di potenza questa alternativa non sembra essere favorevole.

Al fine di raggiungere le specifiche richieste dal progetto è necessario incrementare la tensione al carico e ridurre il flusso di corrente del sistema. Se la tensione al carico è aumentata per esempio a 4 kV, la corrente al carico è ridotta e le perdite di trasmissione sono significativamente ridotte (~60%). Questo in ogni caso richiederà al punto di arrivo un dispositivo che converte la tensione da 4 a 2 kV. L'inclusione di un trasformatore nel

	PROGETTO NEMO ALLEGATO: POTENZA ELETTRICA, SISTEMA DI TRASFERIMENTO E DISTRIBUZIONE SUL FONDO	Data creazione 25-10-2001 15:22 Pagina 10 di 55 ALL-Distr_potenza-Rev-A.doc Rev:A
---	---	--

punto di arrivo avrà probabilmente un impatto positivo sulla stabilità del sistema di potenza (riduzione di capacità di corto circuito del circuito). L'impatto tecnico ed economico dell'inclusione di un trasformatore deve essere considerato a livello di sistema.

3.3 Ipotesi 2: cavo 3x50mm²

Come si evince dallo schema precedente il cavo equipaggiato con 3 conduttori da 25mm² non è una buona alternativa.

In questa ipotesi viene considerato l'effetto dell'incremento dei conduttori da 3x50mm². In questo caso lo spessore dell'isolamento è di 2.5 mm (PE). Lo schema del cavo in questione è mostrato in Fig. 2.

	PROGETTO NEMO ALLEGATO: POTENZA ELETTRICA, SISTEMA DI TRASFERIMENTO E DISTRIBUZIONE SUL FONDO	Data creazione 25-10-2001 15:22 Pagina 11 di 55 ALL-Distr_potenza-Rev-A.doc Rev:A
---	---	--

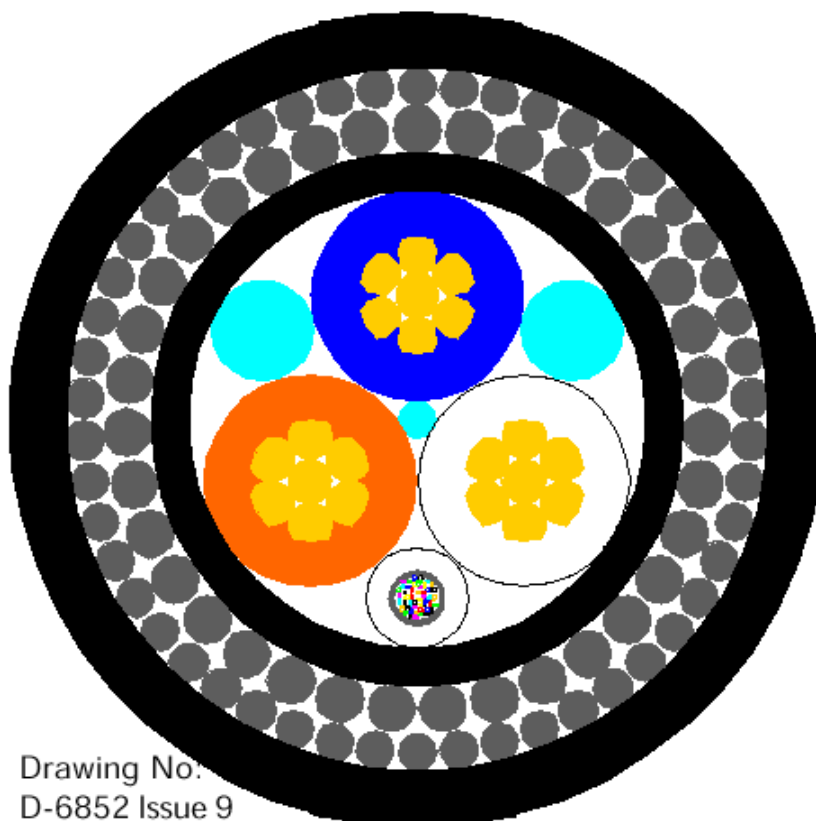


Figura 2. 3-Fasi AC Cavo, $3 \times 50 \text{ mm}^2$.

La tabella 2 mostra il dimensionamento del cavo e il risultato approssimato dei calcoli di caduta di tensione e delle perdite per alimentare un carico di 80kW ($\cos \phi = 1$).

Tabella 2. Dati approssimati delle dimensioni, caduta di tensione sul cavo e perdite sul cavo $3 \times 50 \text{ mm}^2$.

Proprietà	Unità	Valore
-----------	-------	--------

	PROGETTO NEMO ALLEGATO: POTENZA ELETTRICA, SISTEMA DI TRASFERIMENTO E DISTRIBUZIONE SUL FONDO	Data creazione 25-10-2001 15:22 Pagina 12 di 55 ALL-Distr_potenza-Rev-A.doc Rev:A
---	---	---

Diametro Esterno	mm	55
Peso in Aria	kg/m	6.7
Perdita di Potenza	kW	75
Caduta di Tensione	kV	1.8
Tensione di Alimentazione	kV	3.8

I calcoli mostrano che in questo caso le perdite di potenza sono approssimativamente dimezzate in comparazione al cavo 3x25mm².

Il generatore in questo caso dovrà fornire 160 kW per alimentare il carico. Un differente fattore di potenza incrementerà ancora questo valore. Per ottenere una tensione di 2 kV, la tensione di alimentazione del generatore dovrà essere di 4 kV.

5 Sistema in DC

Nel considerare l'alternativa di trasmissione in DC ci sono due possibili sistemi:

13 Sistema monopolare in DC con anodo in mare per il ritorno della corrente

	PROGETTO NEMO ALLEGATO: POTENZA ELETTRICA, SISTEMA DI TRASFERIMENTO E DISTRIBUZIONE SUL FONDO	Data creazione 25-10-2001 15:22 Pagina 13 di 55 ALL-Distr_potenza-Rev-A.doc Rev:A
---	---	--

- 14 Sistema bipolare in DC. Questo richiede l'uso di un secondo conduttore per il ritorno della corrente. Questo conduttore può essere incluso nel cavo o in un cavo separato.

Un sistema monopolare richiede la realizzazione di un elettrodo in mare su entrambe le terminazioni del cavo di trasmissione. Questi elettrodi dovranno essere collocati sia sul fondo marino, nelle immediate vicinanze del carico, che in acqua nelle immediate prossimità del generatore a terra. Un sistema monopolare richiede quindi una dettagliata valutazione del sistema di anodi e il suo effetto sulla corrente stazionaria. Inoltre bisogna tenere conto degli effetti di corrosione in acqua che incideranno sul tempo di vita del sistema. A causa di reazioni elettrochimiche sugli elettrodi del sistema di ritorno via mare si verifica una generazione di gas clorati, esiste quindi anche un aspetto di impatto ambientale da tenere in considerazione. Tutto ciò potrebbe rappresentare una difficoltà per ottenere i necessari permessi di concessione per la realizzazione di un impianto simile.

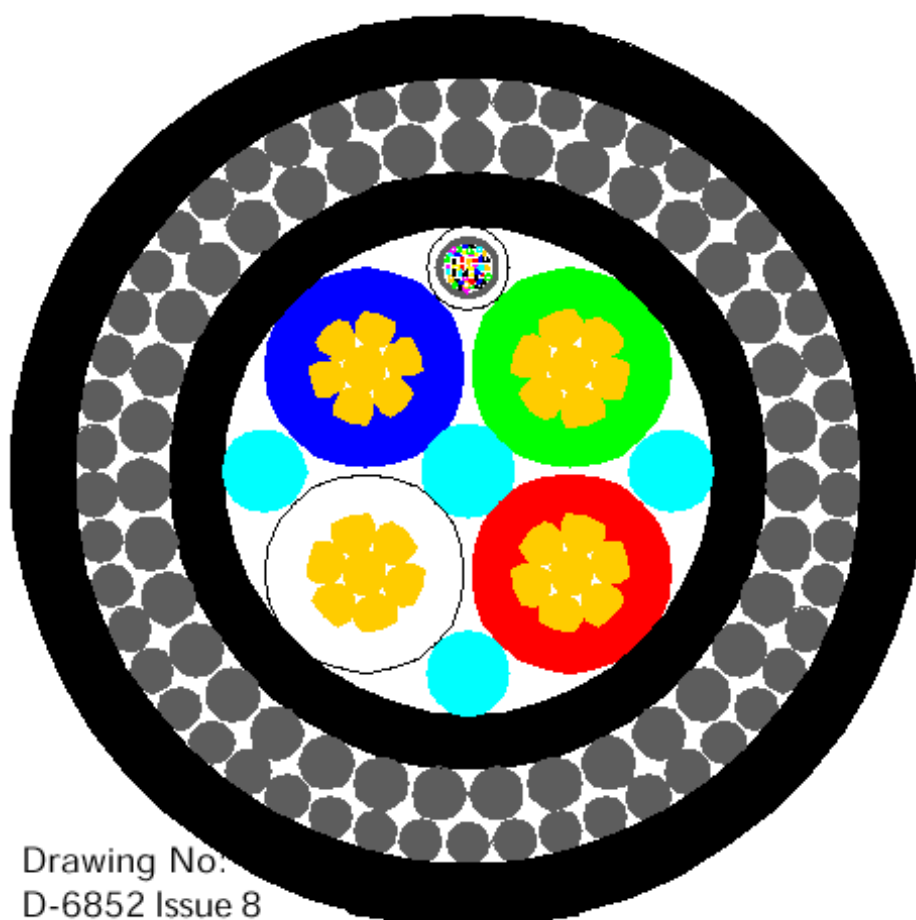
5.1 Ipotesi 1: Sistema monopolare (ritorno via mare)

Nel caso della progettazione un sistema monopolare risulterà la più semplice realizzazione in quanto il cavo avrà un dimensionamento più piccolo e un peso più leggero. Da quanto detto sopra, esiste in ogni caso una significativa difficoltà di progettazione degli elettrodi di ritorno via mare. Una figura di riferimento di un cavo in questione rimane la figura 1.

5.2 Ipotesi 2: Sistema bipolare (ritorno via cavo)

	PROGETTO NEMO ALLEGATO: POTENZA ELETTRICA, SISTEMA DI TRASFERIMENTO E DISTRIBUZIONE SUL FONDO	Data creazione 25-10-2001 15:22 Pagina 14 di 55 ALL-Distr_potenza-Rev-A.doc Rev:A
---	---	--

Nel caso di un sistema bipolare è richiesto che un conduttore di ritorno sia incluso. Come detto precedentemente questo può essere ottenuto incorporando il conduttore di ritorno nel cavo principale o avere il conduttore di ritorno come un cavo separato. Considerando la complessità e i costi delle operazioni di posa, il conduttore di ritorno incorporato nel cavo rappresenta la soluzione ottimale. Poiché la caduta di tensione è significativa, la miglior soluzione è la progettazione di un cavo con conduttore di ritorno della stessa sezione del conduttore di trasmissione. Il miglior modo per realizzarne la costruzione è progettare una struttura centrale con 4 conduttori di cui 2 sono utilizzati per la trasmissione e 2 per il ritorno. La composizione di questo cavo è mostrata nella figura3.



	PROGETTO NEMO ALLEGATO: POTENZA ELETTRICA, SISTEMA DI TRASFERIMENTO E DISTRIBUZIONE SUL FONDO	Data creazione 25-10-2001 15:22 Pagina 15 di 55 ALL-Distr_potenza-Rev-A.doc Rev:A
---	---	--

Figura 3. Cavo Bipolare, $4 \times 35 \text{ mm}^2$.

La tabella 3 mostra il dimensionamento del cavo e il risultato approssimato dei calcoli di caduta di tensione e delle perdite per alimentare un carico di 80kW.

Tabella 3. Dati approssimati delle dimensioni, caduta di tensione sul cavo e perdite sul cavo $3 \times 50 \text{ mm}^2$.

Proprietà	Unità	Valore
Diametro Esterno	mm	55
Peso in Aria	kg/m	6.6
Perdita di Potenza	kW	85
Caduta di Tensione	kV	2.1
Tensione di Alimentazione DC	kV	4.1

I calcoli mostrano che in questo caso le perdite di potenza sono comparabili con il cavo in AC da $3 \times 50 \text{ mm}^2$. Un generatore in grado di fornire 170 kW è richiesto per alimentare

	PROGETTO NEMO ALLEGATO: POTENZA ELETTRICA, SISTEMA DI TRASFERIMENTO E DISTRIBUZIONE SUL FONDO	Data creazione 25-10-2001 15:22 Pagina 16 di 55 ALL-Distr_potenza-Rev-A.doc Rev:A
---	---	--

il cavo. Per ottenere una tensione al carico di 2 kV la tensione di alimentazione del generatore sarà approssimativamente 4.1 kV.

	PROGETTO NEMO ALLEGATO: POTENZA ELETTRICA, SISTEMA DI TRASFERIMENTO E DISTRIBUZIONE SUL FONDO	Data creazione 25-10-2001 15:22 Pagina 17 di 55 ALL-Distr_potenza-Rev-A.doc Rev:A
---	---	--

6 AC o DC

I sistemi tradizionali di distribuzione di potenza per cavi sottomarini prevedono un trasferimento a corrente costante in DC, di contro i trasferimenti terrestri prevedono un sistema a tensione costante in AC.

Inoltre un parametro importante da prendere in considerazione è se prevedere un sistema di distribuzione a due fili o con ritorno via mare.

Lo standard di trasferimento terrestre di potenza, ormai ampiamente accettato, è la corrente alternata in quanto i trasformatori permettono un cambiamento della tensione in modo più efficiente rispetto a sistemi in DC. Con un trasformatore, inoltre, è possibile utilizzare alta tensione per trasmettere potenza in modo più efficiente da un generatore remoto e convertire in bassa tensione al carico. Le perdite di trasmissione variano con I^2R , dove R è la resistenza serie della linea e I la corrente che l'attraversa. Un raddoppiamento della tensione e un dimezzamento della corrente diminuiscono le perdite di un fattore 4. Tuttavia, le recenti evoluzioni tecnologiche, hanno permesso lo sviluppo di convertitori DC/DC molto efficienti e pertanto questi sistemi sono diventati uno standard nelle installazioni sottomarine.

Si vogliono esporre qui di seguito i maggiori problemi con l'uso di trasferimento in DC:

- difficoltà maggiore a interrompere un circuito, aprire un interruttore, possibile fusione di un fusibile, estrarre un connettore con correnti elevate, tutto ciò con possibile creazione di un arco di sovratensione che potrebbe danneggiare il carico. L'elettronica deve essere progettata per lavorare sotto queste condizioni, tutto ciò con conseguente aumento di costi e complessità.
- I sistemi in DC hanno problemi di isolamento elettrico che non esistono nel mondo della AC. Periodi lunghi di eccitazione in DC tendono a causare rottura dell'isolamento "Treeing". Migrazione e intrappolamento di cariche possono creare perdite nelle caratteristiche di isolamento del cavo. Tutto ciò richiede un approccio di tipo conservativo per stimare i cavi sottomarini che trasportano DC.

	PROGETTO NEMO ALLEGATO: POTENZA ELETTRICA, SISTEMA DI TRASFERIMENTO E DISTRIBUZIONE SUL FONDO	Data creazione 25-10-2001 15:22 Pagina 18 di 55 ALL-Distr_potenza-Rev-A.doc Rev:A
---	---	---

Il problema, di contro, nel trasferimento in AC su lunghe linee è rappresentato dalla capacità C del cavo e dal relativo alto valore di corrente per caricare questa capacità. In ogni caso il trasporto in AC su un lungo cavo può essere fortemente influenzato dalle sue proprietà elettriche. Il problema può essere compreso solo prendendo in considerazione i vari parametri in AC come l'induttanza, la resistenza serie e la capacità di shunt. Questi effetti, parecchio complessi, vengono trattati normalmente tramite l'uso di diagrammi vettoriali.

La più semplice rappresentazione di una linea di trasferimento di potenza è mostrata in Fig. 4. Il modello è formato da una resistenza e una induttanza serie.

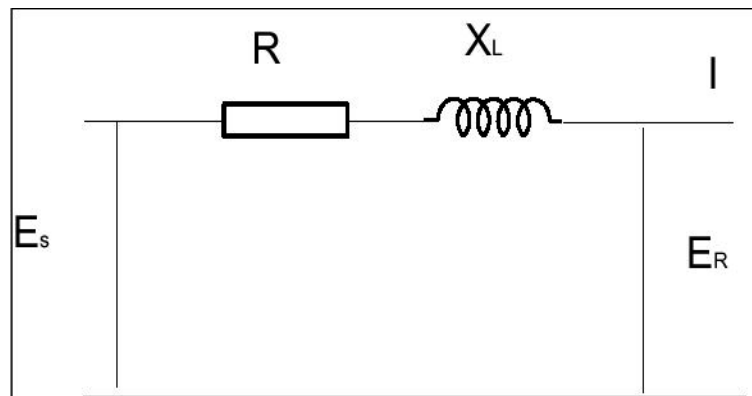


Fig. 4 Modello di una linea di potenza

Si è assunto una resistenza serie di $1 \text{ } \Omega/\text{km}$. L'induttanza serie in genere non è fornita dai costruttori ma può essere stimata, nel nostro caso intorno a 1 mH/km . A 50 Hz la reattanza serie per unità di lunghezza è data da:

$$X_L = 0.15 \ln (D/r_1)$$

	PROGETTO NEMO ALLEGATO: POTENZA ELETTRICA, SISTEMA DI TRASFERIMENTO E DISTRIBUZIONE SUL FONDO	Data creazione 25-10-2001 15:22 Pagina 19 di 55 ALL-Distr_potenza-Rev-A.doc Rev:A
---	---	---

Dove X_L è espressa in ohm/km, D è la distanza in cui si trova il conduttore di ritorno e r_1 è il raggio del conduttore. Se si considera $r_1 = 3$ mm e $D = 15$ mm $X_L = 0.24$ ohm/km.

Ovviamente il valore cambia in funzione della distanza della corrente di ritorno. Per un metro di distanza D/r_1 l'impedenza diventa 0.9 ohm/km, per un km di distanza sarà di 1.9 ohm/km

L'induttanza serie permette un modello semplice, valido per linee corte, come quello mostrato nella figura. Il diagramma vettoriale di figura 5 mostra l'effetto della trasmissione di potenza. La tensione sul lato finale E_R è presa come riferimento. Tipicamente la corrente come mostrata in figura è in ritardo rispetto alla tensione. La IR che rappresenta la caduta di tensione parallela alla corrente che corrisponde alla tensione necessaria ai capi del carico (E_S) per i parametri e valori scelti.

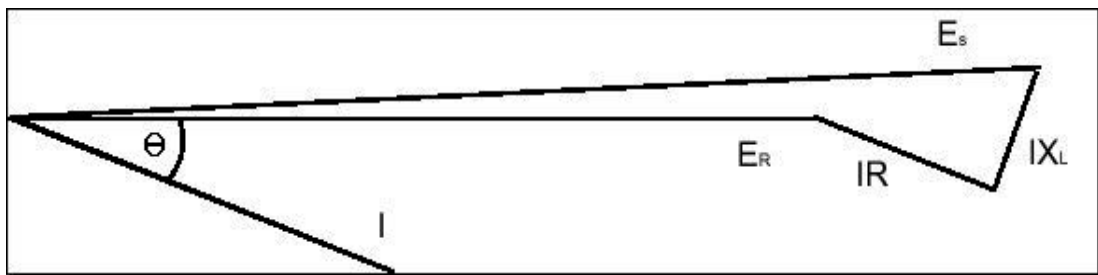


Fig. 5 Modello vettoriale di una linea di potenza

Per la nostra applicazione la situazione è più complessa. Deve essere presa in considerazione la capacità di shunt del cavo. Considerando un cavo lungo 100 km la capacità di shunt è circa 0.2 microF/km o 130 Ω a 50 Hz. La corrente di carica a 5 kV è 38 A. Frequentemente, per lunghe linee di trasporto, una condensatore serie viene

	PROGETTO NEMO ALLEGATO: POTENZA ELETTRICA, SISTEMA DI TRASFERIMENTO E DISTRIBUZIONE SUL FONDO	Data creazione 25-10-2001 15:22 Pagina 20 di 55 ALL-Distr_potenza-Rev-A.doc Rev:A
---	---	--

inserito per ridurre l'effetto dell'induttanza serie. In ogni caso il costo richiesto e l'aumento di complessità per la compensazione della linea deve essere preso in considerazione. Con lunghezze di cavo di circa 100 km a 5 kV potrebbero essere necessari circa 200 kVA_r di compensazione. Una stima dei costi potrebbe prevedere per tale soluzione circa 2 Euro/W per i trasformatori e circa 5 Euro/W per i rifasatori. Quindi per 100 km di cavo una cifra stimata potrebbe aggirarsi intorno a 1Meuro per compensare la reattanza.

Mentre dal punto di vista tecnico alla questione AC o DC non è facile dare una risposta, certamente dal punto di vista dei costi la DC è favorita.

7 Danneggiamenti Cavo/Connettore

Qualunque sia la scelta del sistema, il cavo deve essere terminato tramite connettori. Considerando la profondità dell'acqua in questione la scelta rappresenta in ogni caso una grande sfida.

Per ottenere una piena valutazione delle conseguenze di possibili danneggiamenti del cavo equipaggiato di connettore, il sistema di potenza deve essere analizzato. Questo argomento non fa parte di questo capitolo ma alcuni commenti vengono anticipati.

Nel caso di un sistema trifase in AC, basse resistenze di isolamento, verso il mare, di una fase produrranno incrementi di tensione sulle altre due fasi. Se si verifica un corto circuito, la tensione incrementerà di un fattore 3. Se 2 fasi saranno in corto circuito il sistema non funzionerà.

Nel caso di un sistema monopolare in DC, basse resistenze di isolamento verso il mare ridurranno la capacità trasmissiva. In presenza di un corto circuito il sistema non funzionerà.

	PROGETTO NEMO ALLEGATO: POTENZA ELETTRICA, SISTEMA DI TRASFERIMENTO E DISTRIBUZIONE SUL FONDO	Data creazione 25-10-2001 15:22 Pagina 21 di 55 ALL-Distr_potenza-Rev-A.doc Rev:A
---	---	--

Nel caso di un sistema bipolare in DC, l'influenza di un corto circuito verso il mare dipende dalla messa a terra della rete. Se la rete è isolata, il sistema funzionerà anche in presenza di rottura della messa a terra. Se la rete è messa a terra, la corrente di ritorno passerà parzialmente attraverso l'acqua del mare fino al generatore. Con un cortocircuito del conduttore di trasmissione il sistema non funzionerà.

8 Comparazione costi relativi

Nella tabella 4 vengono forniti i costi relativi alle differenti soluzioni analizzate. Nella comparazione sono inclusi il costo del cavo e nel caso del sistema monopolare DC è inclusa una stima dei costi del sistema di ritorno via mare.

Tabella 4. Comparazione costi relativi

Sistema	Cavo	Costo Relativo
Monopolare DC ¹	3 x 25 mm	100%
3 Fasi AC	3 x 50 mm	130%
Monopolare DC incluso ritorno via mare ²	3 x 25 mm	150%
Bipolare DC	4 x 35 mm	130%

¹Costo di riferimento del cavo

²Costo del cavo incluso di elettrodi per il ritorno della corrente via mare

	PROGETTO NEMO ALLEGATO: POTENZA ELETTRICA, SISTEMA DI TRASFERIMENTO E DISTRIBUZIONE SUL FONDO	Data creazione 25-10-2001 15:22 Pagina 22 di 55 ALL-Distr_potenza-Rev-A.doc Rev:A
---	---	--

La comparazione mostra che il costo di un sistema trifase e un sistema bipolare DC sono uguali, mentre il costo di un sistema monopolare DC con ritorno via mare è da considerarsi alto.

	PROGETTO NEMO ALLEGATO: POTENZA ELETTRICA, SISTEMA DI TRASFERIMENTO E DISTRIBUZIONE SUL FONDO	Data creazione 25-10-2001 15:22 Pagina 23 di 55 ALL-Distr_potenza-Rev-A.doc Rev:A
---	---	--

9 Conclusioni

Come fatto notare diverse volte nel documento, la scelta sul modo trasmissivo, livello di tensione, livello di corrente etc. dovrebbe tenere conto di tutti i parametri che compongono il sistema di potenza. In entrambi i sistemi AC o DC è necessario considerare la sua elettronica, e i componenti che realizzeranno l'intera rete di distribuzione. La scelta dell'appropriato sistema di potenza dipende da molteplici fattori, come la stabilità di tensione, livello di capacità ai corto circuiti, etc.

Il sistema di potenza quindi probabilmente avrà un impatto significativo sul costo totale della rete trasmissiva di potenza.

La realizzazione del cavo, sia per tensioni AC che DC, e' descritta in questo documento e calcoli approssimati delle perdite danno adeguate informazioni per consentire l'implementazione del cavo principale per il progetto Nemo. Le perdite sul cavo nelle differenti soluzioni sono piuttosto alte. Le perdite possono essere ridotte incrementando la sezione dei conduttori o riducendo la corrente sul carico (incrementando la tensione sul carico). Conduttori di sezione maggiore aggiungeranno però un significativo peso alla costruzione del cavo che necessariamente comporterà un incremento dell'armatura di protezione.

Dalla comparazione dei costi emerge chiaramente che un sistema trifase AC e un sistema Bipolare DC sono identici, di contro il costo di un sistema monopolare DC, incluso degli elettrodi di ritorno via mare, è alquanto più alto.

Se l'analisi della rete mostra che un sistema trifase AC è più favorevole, il cavo con conduttore di $3 \times 50 \text{ mm}^2$ dovrebbe essere implementato. Se l'analisi della rete mostra che il sistema DC è preferibile, il sistema bipolare con un cavo da $4 \times 35 \text{ mm}^2$ dovrebbe essere scelto, dove due conduttori sono usati per la trasmissione e due per il ritorno.

	PROGETTO NEMO ALLEGATO: POTENZA ELETTRICA, SISTEMA DI TRASFERIMENTO E DISTRIBUZIONE SUL FONDO	Data creazione 25-10-2001 15:22 Pagina 24 di 55 ALL-Distr_potenza-Rev-A.doc Rev:A
---	---	---

10 Sistema di distribuzione della potenza elettrica sulla maglia sottomarina

10.1 Serie o parallelo

Normalmente nei cavi sottomarini per telecomunicazioni è utilizzata la tecnica della connessione serie fra il generatore e i carichi connessi.

Considerando la distanza dalla costa, attualmente prevista intorno a 100 km, sono state dimensionate le distanze di interconnessione fra le varie strutture che compongono il sistema, tenendo conto di due possibili sistemi di distribuzione. Di seguito viene mostrata una comparazione fra un sistema serie e un sistema parallelo di interconnessione fra 64 torri alte 600 m ciascuna e distanziate di 180 m fra loro.

Le due figure mostrano un sistema con un singolo generatore e tre carichi, di 64, ognuno richiedente la stessa potenza. Il primo carico è posto a circa 100 km di distanza dal generatore e i successivi carichi sono posti rispettivamente a +44km e a +88 km.

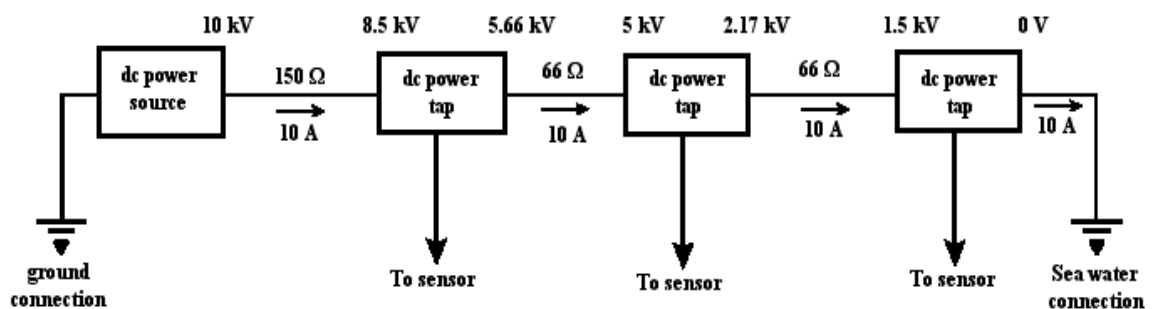


Fig.6 Distribuzione della corrente e della tensione in un sistema serie.

	PROGETTO NEMO ALLEGATO: POTENZA ELETTRICA, SISTEMA DI TRASFERIMENTO E DISTRIBUZIONE SUL FONDO	Data creazione 25-10-2001 15:22 Pagina 25 di 55 ALL-Distr_potenza-Rev-A.doc Rev:A
---	---	---

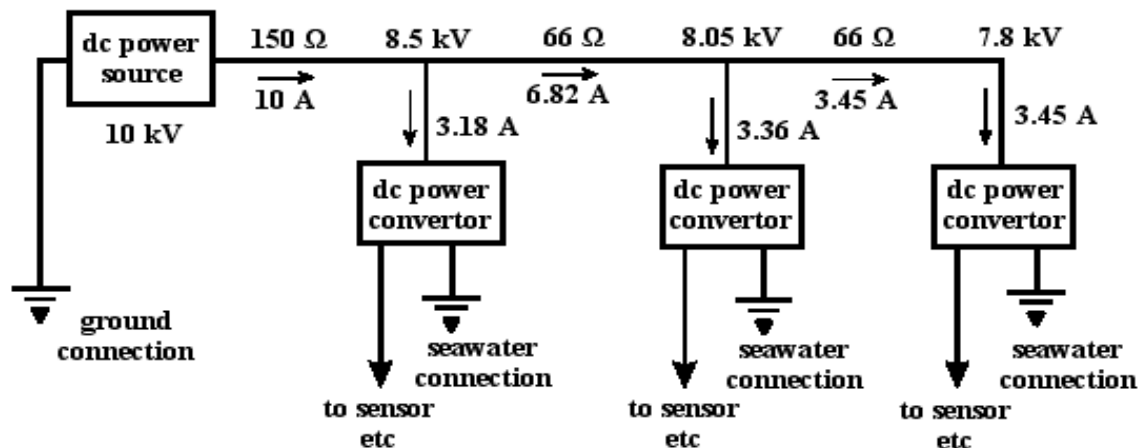


Fig.7 Distribuzione della corrente e della tensione in un sistema parallelo.

Le precedenti figure indicano che lo schema parallelo offre il vantaggio rispetto al sistema serie di essere più efficiente. In entrambi i casi il generatore eroga 10 kW, con una tensione di 10 kV e una corrente di 10 A. I valori mostrano che la connessione parallela fornisce 27 kW utile ad ogni torre, contro i 23 kW del sistema serie. Di conseguenza la connessione parallela offre maggiori vantaggi in termini di potenza.

Si fa notare che nella connessione serie la corrente è costante, la tensione nel sistema parallelo non è costante. Ciò significa che i DC/DC converter devono essere in grado di far fronte a diversi valori di tensione di ingresso mentre produrranno un costante valore di tensione di uscita.

	PROGETTO NEMO ALLEGATO: POTENZA ELETTRICA, SISTEMA DI TRASFERIMENTO E DISTRIBUZIONE SUL FONDO	Data creazione 25-10-2001 15:22 Pagina 26 di 55 ALL-Distr_potenza-Rev-A.doc Rev:A
---	---	---

11 .Struttura distribuzione di energia

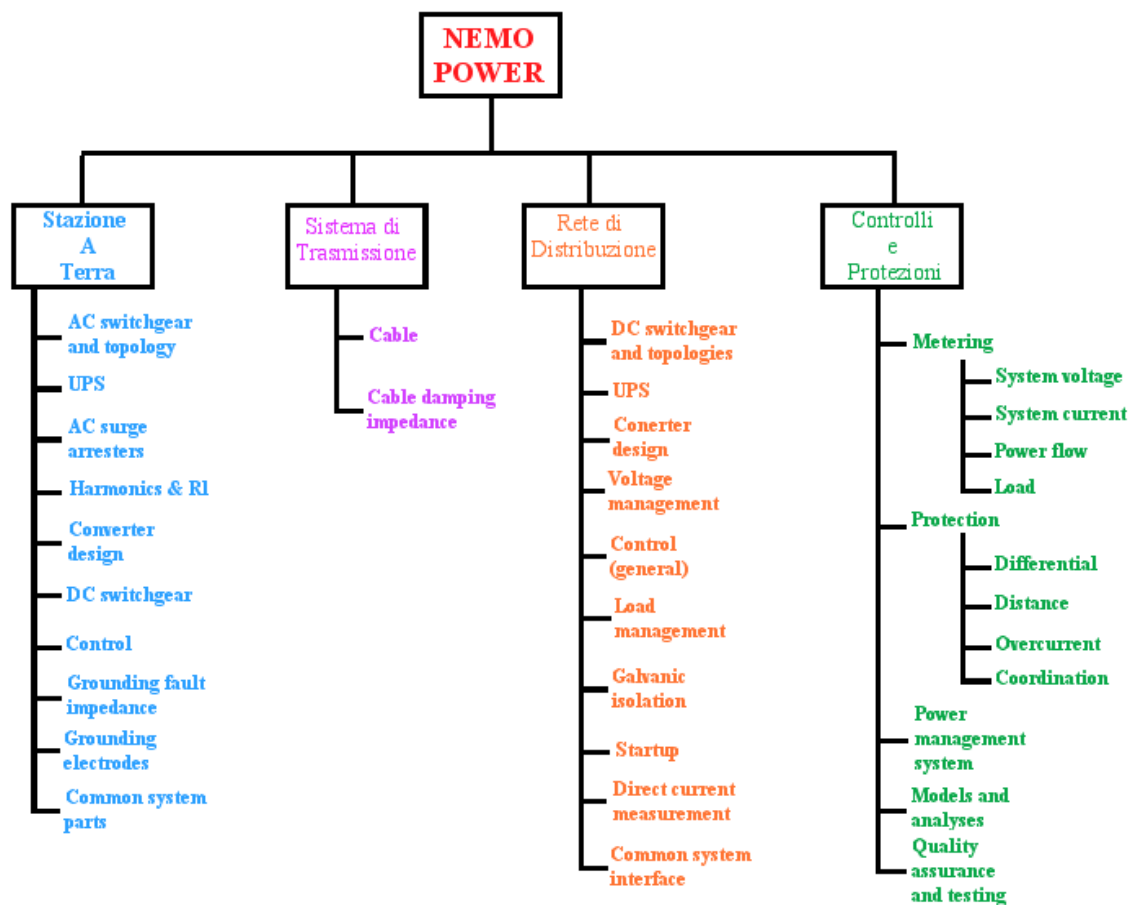


Fig. 8 Schema a blocchi del sistema di trasferimento, distribuzione e controlli della potenza elettrica

Il sistema di potenza che fornirà energia all'infrastruttura è suddiviso, per convenienza, in quattro sottosistemi:

- La stazione a terra

	PROGETTO NEMO ALLEGATO: POTENZA ELETTRICA, SISTEMA DI TRASFERIMENTO E DISTRIBUZIONE SUL FONDO	Data creazione 25-10-2001 15:22 Pagina 27 di 55 ALL-Distr_potenza-Rev-A.doc Rev:A
---	---	--

- Il sistema di trasmissione
- Rete di distribuzione
- Controlli e protezioni

Ognuno dei sottosistemi opera con diverse caratteristiche. Per esempio nella stazione a terra la rete sarà convertita in forma adatta ad essere distribuita sul cavo, un UPS sarà utilizzato per prevenire le interruzioni di rete. La stazione a terra inoltre deve anche monitorare e controllare l'intera distribuzione di potenza, e deve essere in grado di regolare la tensione o la corrente in funzione delle variazioni del carico. Per soddisfare questi requisiti il sistema necessita l'invio a terra di dati di controllo Fig. 8. Un ruolo importante è determinato sia dall'affidabilità del mezzo trasmissivo che dalla sua ridondanza, ed inoltre dalla combinazione di controlli sia locali che remoti della stazione di fondo incluso le protezioni locali per prevenire guasti catastrofici.

Pertanto di seguito si da una descrizione dei sottosistemi.

11.1 Stazione a Terra

La funzione della stazione è di convertire nella forma utile, dalla rete elettrica, la potenza necessaria all'infrastruttura. Sulla scorta delle considerazioni precedenti la scelta di utilizzare un normale cavo sottomarino per telecomunicazioni non può essere effettuata, in quanto, come già esposto, una connessione serie a corrente costante di 1 A, utilizzata su cavi convenzionali per telecomunicazioni, fornirebbe una potenza insufficiente. Pertanto la strada praticabile sembra l'uso di un cavo realizzato appositamente per il trasporto di energia.

La stazione a terra sarà costituita da un convertitore AC/DC o AC/AC suddivisa in varie unità come di seguito mostrato.

	PROGETTO NEMO ALLEGATO: POTENZA ELETTRICA, SISTEMA DI TRASFERIMENTO E DISTRIBUZIONE SUL FONDO	Data creazione 25-10-2001 15:22 Pagina 28 di 55 ALL-Distr_potenza-Rev-A.doc Rev:A
---	---	--

11.2 AC Switchgear and Topologies

La potenza in AC di alimentazione della stazione sarà ottenuta tramite connessione alla rete di distribuzione ENEL a 20 kV e, tramite la realizzazione di apposita cabina di trasformazione, convertita in una tensione trifase a 400 V.

Con una singola linea di alimentazione è opportuno dotare il sistema di un UPS (Uninterruptible Power Supply) con sistema automatico di aggancio durante la mancanza di rete

11.3 Uninterruptible Power Supply (UPS)

Per semplicità, la presente specifica, è basata su un design di riferimento che corrisponde a un layout mostrato in Fig.9. Lo specificato UPS copre un largo range di uso, quindi il proposto layout di fig.1 deve essere considerato come guida.

	PROGETTO NEMO ALLEGATO: POTENZA ELETTRICA, SISTEMA DI TRASFERIMENTO E DISTRIBUZIONE SUL FONDO	Data creazione 25-10-2001 15:22 Pagina 29 di 55 ALL-Distr_potenza-Rev-A.doc Rev:A
---	---	---

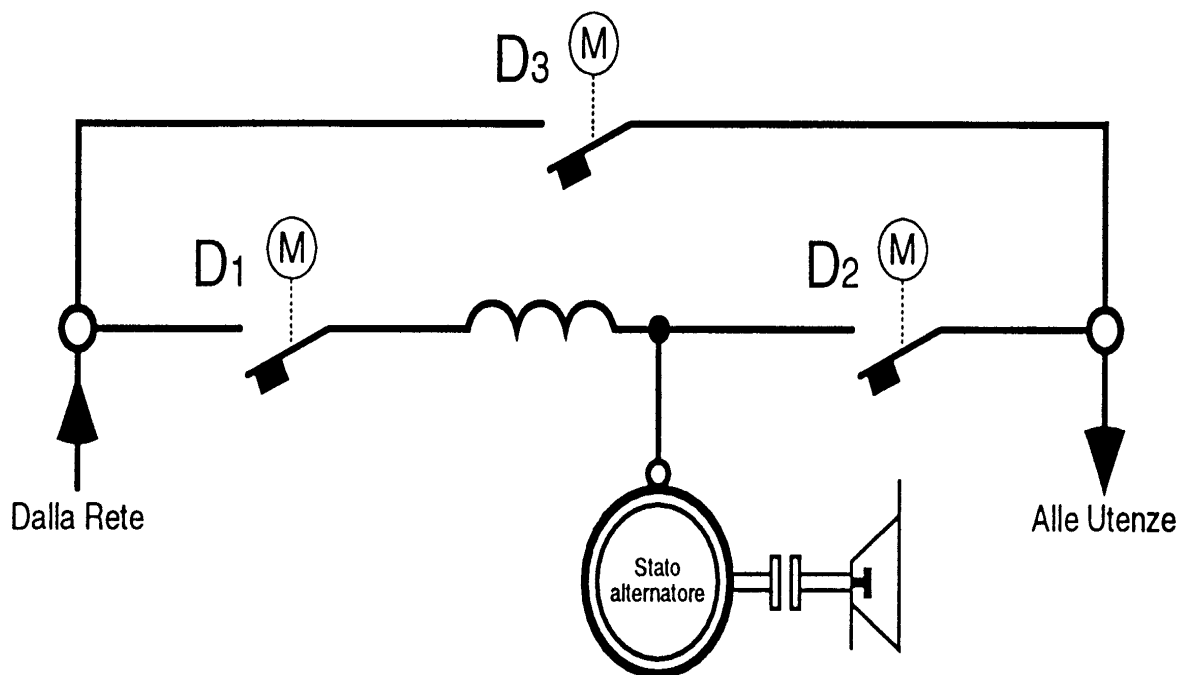


Fig. 9 Schema di principio di un UPS

Il principio di funzionamento del circuito di Fig.9 è il seguente:

L'UPS in oggetto si compone essenzialmente di un motore diesel, una frizione elettromagnetica, un generatore sincro trifase con volano elettrico, reattanze e un sistema di controllo.

Il sistema deve garantire la regolazione della rete, filtrare gli eventuali disturbi di rete e fornire potenza reattiva migliorando il fattore di potenza verso rete.

Durante la condizione normale di funzionamento, gli interruttori D1 e D2 sono chiusi e la rete alimenta il carico attraverso la reattanza R.

Contemporaneamente viene alimentato il generatore sincro, che in queste condizioni, assolve la funzione di un compensatore sincro.

	PROGETTO NEMO ALLEGATO: POTENZA ELETTRICA, SISTEMA DI TRASFERIMENTO E DISTRIBUZIONE SUL FONDO	Data creazione 25-10-2001 15:22 Pagina 30 di 55 ALL-Distr_potenza-Rev-A.doc Rev:A
---	---	--

Nel caso di mancanza di rete o variazioni oltre i limiti di sicurezza predefinibili, l'interruttore D1 viene aperto. Il carico in questa fase è alimentato dal volano.

Nello stesso momento il motore Diesel, opportunamente preriscaldato, si avvia e raggiunge la sua velocità di regime, alimentando il carico entro un tempo regolabile. Il tempo che intercorre tra l'avviamento e l'alimentazione del carico è dato dall'accoppiamento dello stesso, tramite frizione elettromagnetica, al generatore. Nel periodo di transizione dal tempo 0 alla velocità di regime, l'energia necessaria al trascinamento del generatore viene fornita dal volano.

Al ritorno della rete, nel caso sia stata raggiunta la velocità di regime, l'interruttore D1 viene chiuso e il sistema è nuovamente collegato alla rete. Subito dopo l'accoppiamento elettromagnetico il motore diesel viene diseccitato ed arrestato dopo un tempo regolabile.

L'avviamento del motore diesel è ritardato allo scopo di impedire che semplici microinterruzioni di rete avviino il motore. Le microinterruzioni, pertanto, sono eliminate e/o compensate dalle induttanze della macchina.

L'avviamento del motore diesel è garantito dall'accoppiamento elettromagnetico, che viene attivato dopo un tempo prefissato dalla caduta di rete, facendo sì che il volano trascini il diesel, per l'avviamento, entro il tempo richiesto. Tutto ciò in funzione anche dell'ipotesi che il sistema di avviamento del diesel vada in panne.

L'UPS dovrà assicurare in ogni circostanza la perfetta alimentazione dei carichi ad esso connessi anche in presenza delle seguenti anomalie sulla rete:

- Mancanza di una fase
- Microinterruzioni
- Cadute di tensione

	PROGETTO NEMO ALLEGATO: POTENZA ELETTRICA, SISTEMA DI TRASFERIMENTO E DISTRIBUZIONE SUL FONDO	Data creazione 25-10-2001 15:22 Pagina 31 di 55 ALL-Distr_potenza-Rev-A.doc Rev:A
---	---	--

- Sovratensioni transitorie o permanenti
- Cortocircuiti a monte
- squilibrio della tensione sulle tre fasi

L'UPS in oggetto inoltre deve soddisfare i seguenti requisiti:

- eliminazione delle armoniche reiettate in rete
- eliminazione dei disturbi sia a monte che a valle causati da:
- cortocircuiti
- fulmini e scariche atmosferiche
- picchi di tensione o corrente dovuti a cause varie

11.4 AC Surge Arrester

Il sistema di generazione della potenza potrebbe essere suscettibile a scariche atmosferiche pertanto la stazione deve essere dotata di adeguato sistema di protezione.

11.5 Harmonic and Radio Interference Filters

Il convertitore di potenza posto nella stazione genererà armoniche e interferenze radio. Queste potrebbero creare problemi alla restante strumentazione.. La stazione sarà equipaggiata di opportuni filtri, sul lato AC, per la loro riduzione a livelli accettabili.

	PROGETTO NEMO ALLEGATO: POTENZA ELETTRICA, SISTEMA DI TRASFERIMENTO E DISTRIBUZIONE SUL FONDO	Data creazione 25-10-2001 15:22 Pagina 32 di 55 ALL-Distr_potenza-Rev-A.doc Rev:A
---	---	--

11.6 Converter Design

Esistono diversi metodi per la realizzazione di convertitori AC/Dco AC/AC. Nel caso di un convertitore in DC la scelta più opportuna è un alimentatore a corrente costante con stadio di preregolazione a thyristor.

La potenza totale richiesta, da stime attuali, è intorno a 80 kW al carico, tenendo conto delle perdite sul cavo è ragionevole pensare a un alimentatore che generi una potenza totale di 160 kW.

Per motivi di sicurezza e ridondanza il fabbisogno è di almeno due alimentatori che generino la medesima potenza.

11.7 DC Switchgear

Poiché occorreranno almeno due alimentatori nella stazione, occorrerà un deviatore di potenza per la commutazione dei due alimentatori al carico.

11.8 Control

Il convertitore a terra deve essere controllato e sottostare alle seguenti condizioni:

	PROGETTO NEMO ALLEGATO: POTENZA ELETTRICA, SISTEMA DI TRASFERIMENTO E DISTRIBUZIONE SUL FONDO	Data creazione 25-10-2001 15:22 Pagina 33 di 55 ALL-Distr_potenza-Rev-A.doc Rev:A
---	---	--

- Durante lo startup, quindi in assenza di comunicazione con il lato carico, il convertitore opera in modalità tensione costante. L'operazione di startup comprende la generazione di una rampa da zero alla massima tensione in un certo tempo.
- Non appena il sistema di comunicazione è operativo, il generatore deve essere in grado di erogare in uscita una tensione costante minima in funzione delle esigenze del carico. Minimizzare la tensione può essere utile alla sopravvivenza del cavo.
- Alla presenza di un guasto sul lato DC del convertitore, sia nel cavo che in un nodo, la stazione a terra deve commutare il generatore in modalità di limitazione di corrente.
- Sotto certe condizioni si possono verificare delle condizioni in cui si deve operare a valori di uscita di potenza più alte rispetto alle condizioni normali.

La figura 10.1 mostra vari limiti operativi di V-I. Benché la condizione della regione normale operativa appare corrispondere alla zona di corrente costante, esso è nei fatti il risultato della modalità di tensione costante, come si può vedere dalla figura 10.2.

Infatti, il convertitore deve funzionare come parte del sistema di generazione, e il suo controllo deve essere coordinato dal resto della rete.

Nell'esempio di fig. 10.2, il punto di partenza si trova ad un certo valore di V e I al disotto del 15% della corrente massima. All'aumentare del carico aumenta la corrente. Il generatore mantiene la tensione costante. Questa condizione perdura fino a quando il carico non è costante. In questa condizione la corrente diminuisce e il generatore aumenta la tensione.

	PROGETTO NEMO ALLEGATO: POTENZA ELETTRICA, SISTEMA DI TRASFERIMENTO E DISTRIBUZIONE SUL FONDO	Data creazione 25-10-2001 15:22 Pagina 34 di 55 ALL-Distr_potenza-Rev-A.doc Rev:A
---	---	---

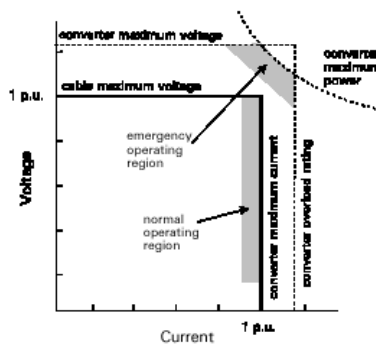


Figura 10.1 Modalità operative e limiti dell'alimentatore V-I (p. u. = unità percentuali)

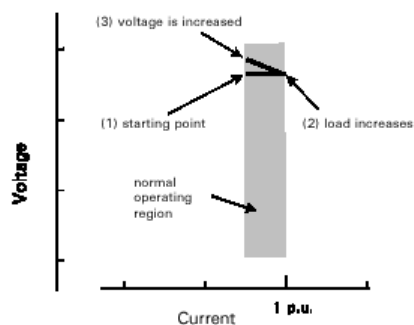


Figura 10.2 Risposta di V-I dell'alimentatore a incrementi del carico.

11.9 Grounding Electrodes

	PROGETTO NEMO ALLEGATO: POTENZA ELETTRICA, SISTEMA DI TRASFERIMENTO E DISTRIBUZIONE SUL FONDO	Data creazione 25-10-2001 15:22 Pagina 35 di 55 ALL-Distr_potenza-Rev-A.doc Rev:A
---	---	--

Qualora la potenza fosse generata in DC con ritorno via mare, il circuito elettrico include degli elettrodi in mare posti in vicinanza del carico e un elettrodo di terra posto nelle vicinanze della stazione a terra. Si propone l'uso pertanto che gli elettrodi sottomarini siano il catodo di questo circuito DC, poiché l'anodo a causa di problemi di corrosione dovuti alla presenza di cloro nell'acqua può necessitare di interventi sostitutivi.

Le caratteristiche degli elettrodi posti a terra presso la stazione sono principalmente bassa resistenza elettrica, bassi costi di manutenzione e sicurezza per il personale.

La bassa resistenza è ottenuta usando dispensori di grande superficie inserendo l'anodo in una zona conduttiva del terreno.

I costi di manutenzione possono essere bassi se l'anodo viene realizzato con materiali che subiscono piccole perdite dovute a elettrolisi o corrosione o distribuendo su più anodi il sistema. Una realizzazione simile il Konti-Skan Link fra Danimarca e Svezia, per esempio, ha utilizzato 25 barre di grafite impregnata. Nell'acqua di mare ogni elettrodo perde 5 g per 1000 Ah. La resistenza è al disotto di 0.1Ω . Un singolo elettrodo così fatto dovrebbe perdere 5 g in circa 7 anni di servizio della struttura.

3.10 Common System Parts

Per quanto possibile si cercherà di standardizzare la componentistica anche in termini di parti di ricambio.

	PROGETTO NEMO ALLEGATO: POTENZA ELETTRICA, SISTEMA DI TRASFERIMENTO E DISTRIBUZIONE SUL FONDO	Data creazione 25-10-2001 15:22 Pagina 36 di 55 ALL-Distr_potenza-Rev-A.doc Rev:A
---	---	--

12 Sistema di Trasmissione della potenza elettrica

Come detto nelle sezioni precedenti il cavo che si intende utilizzare è un cavo per il trasporto di energia in grado di trasferire 80 kW al carico e con una resistenza serie la più bassa possibile per minimizzare la caduta di tensione e i relativi effetti termici.

12.1 Cable

Consiste nell'indagare la possibilità di utilizzo di un cavo non standard che permetta il trasferimento di adeguata potenza al carico.



	PROGETTO NEMO ALLEGATO: POTENZA ELETTRICA, SISTEMA DI TRASFERIMENTO E DISTRIBUZIONE SUL FONDO	Data creazione 25-10-2001 15:22 Pagina 37 di 55 ALL-Distr_potenza-Rev-A.doc Rev:A
---	---	--

Da quanto detto precedentemente si sta procedendo con lo studio di fattibilità del cavo elettro-ottico principale e dei cavi secondari che permetteranno la distribuzione della potenza e dei dati.

12.2 Cable Damping Impedance

Consiste in una valutazione, alla terminazione del cavo, dell'impedenza di damping. Questa valutazione sarà effettuata tramite simulazioni basate su parametri disponibili dei cavi e confrontati con verifiche sperimentali.

13 Sistema di Distribuzione

Il termine sistema di distribuzione è utilizzato per indicare l'intero complesso sottomarino di distribuzione, che comprende i contenitori sottomarini a pressione, (junction box), connessi al cavo principale e dai quali si estrae la potenza per le varie utenze.

Nella figura 11 vengono mostrare tre tipologie di possibili configurazioni. La figura (a) mostra la configurazione più semplice. In ogni caso deve essere possibile la rimozione, per manutenzione, di uno dei nodi e pertanto la configurazione più adeguata sembra la (b), in quanto la lunghezza del cavo è dimensionata per un eventuale recupero in superficie. L'operazione di sconnessione potrebbe essere effettuata utilizzando mezzi sottomarini come i ROV. Questo sicuramente determinerà una maggiore distanza del nodo dal cavo principale, in quanto bisogna tenere in considerazione lo spazio di manovra per tale mezzo (c).

	PROGETTO NEMO ALLEGATO: POTENZA ELETTRICA, SISTEMA DI TRASFERIMENTO E DISTRIBUZIONE SUL FONDO	Data creazione 25-10-2001 15:22 Pagina 38 di 55 ALL-Distr_potenza-Rev-A.doc Rev:A
---	---	---

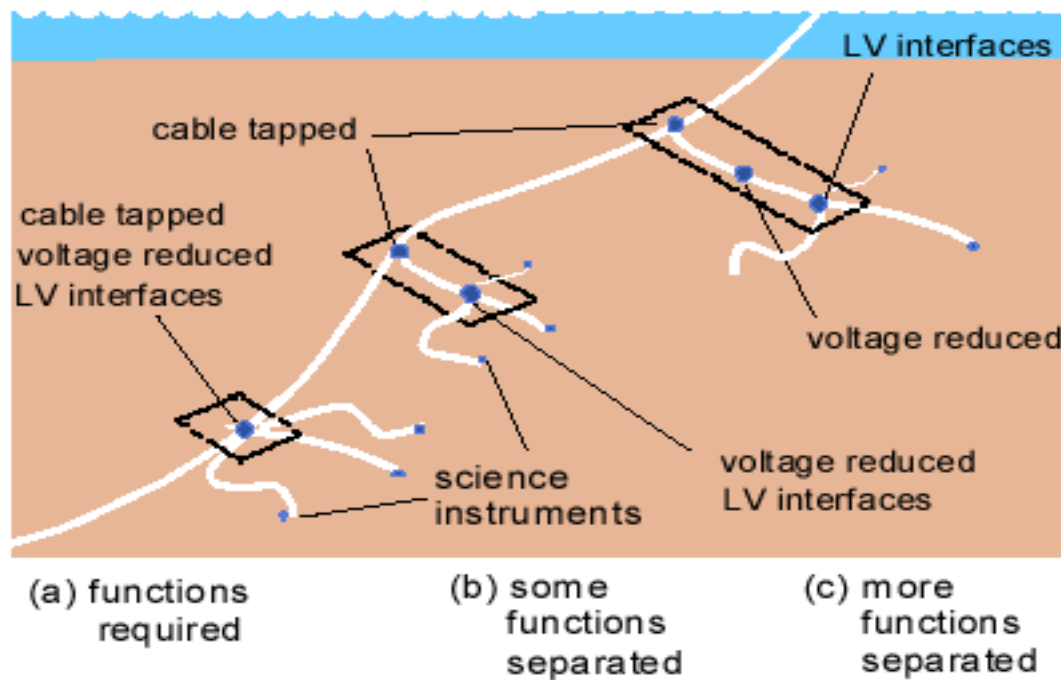


Fig. 11 possibili tipologie di configurazione della rete di distribuzione

L'obiettivo principale di questo sottosistema è la progettazione di un nodo di alimentazione che riduce la tensione di ingresso in forma adattabile e stabile ai dispositivi connessi. L'affidabilità dei nodi, deve essere la più alta e ragionevolmente possibile, ottenibile attraverso attenti controlli di qualità. Questo implica un grado di tolleranza ai guasti acquisibile attraverso una ridondanza interna e vie alternative di alimentazione.

Esistono purtroppo pochi precedenti al mondo su sistemi in DC basati sull'uso di molti convertitori, tutte le applicazioni HVDC esistenti sono realizzate punto a punto. Quindi in questo caso l'utilizzo dell'AC potrebbe dare migliori risultati. Tuttavia con appropriati controlli non esistono controindicazioni per la realizzazione di un sistema multiterminal.

	PROGETTO NEMO ALLEGATO: POTENZA ELETTRICA, SISTEMA DI TRASFERIMENTO E DISTRIBUZIONE SUL FONDO	Data creazione 25-10-2001 15:22 Pagina 39 di 55 ALL-Distr_potenza-Rev-A.doc Rev:A
---	---	---

In termini di progettazione, il controllo dei nodi non può essere separato da un sistema di protezione, (descritto successivamente). Esso deve essere progettato per aumentare l'affidabilità e rimuovere le componenti che possono originare guasti al sistema.

Una parte del sistema a cui si deve porre molta attenzione è il metodo di connessione, che può essere realizzato in termini di penetratori o connettori. Tale scelta verrà effettuata in funzione del sistema di recupero per operazioni di manutenzione, o successive modifiche.

Il metodo utilizzato qui, per discutere della progettazione dei nodi, parte dal flusso di potenza dal cavo principale al carico. Il progetto è suddiviso in sottosistemi come da figura 12.

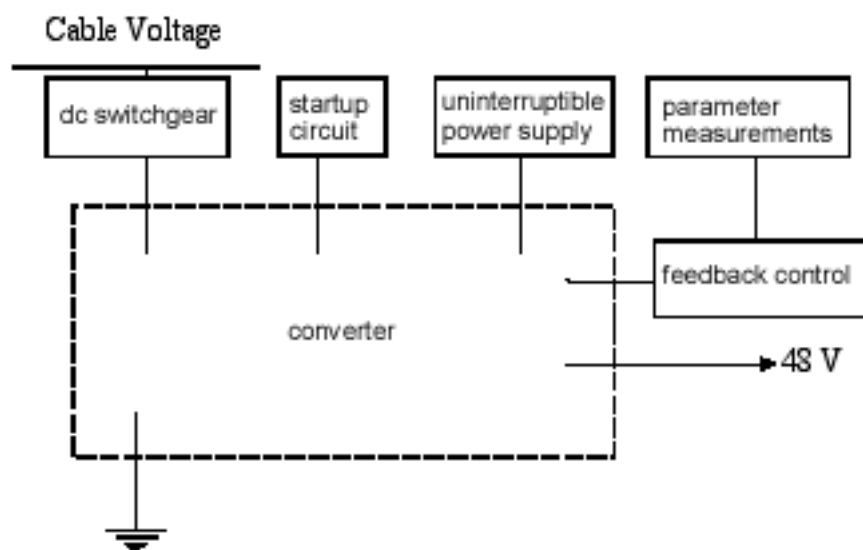


Fig.12 Schema di principio del sistema di distribuzione dell'energia ai nodi in acqua.

Il cavo che alimenta la potenza deve essere isolato dal convertitore tramite un interruttore (switchgear); normalmente questo potrebbe consistere in un circuito interruttore (in grado di intervenire su sovraccarichi di corrente) e isolatore (in grado di interrompere la corrente sul carico) in combinazione.

	PROGETTO NEMO ALLEGATO: POTENZA ELETTRICA, SISTEMA DI TRASFERIMENTO E DISTRIBUZIONE SUL FONDO	Data creazione 25-10-2001 15:22 Pagina 40 di 55 ALL-Distr_potenza-Rev-A.doc Rev:A
---	---	--

Un convertitore per essere operativo richiede corrente. Questa potenza è inizialmente fornita dal cavo attraverso un circuito di startup, cioè un separato convertitore di bassa potenza.

Poiché potrebbero verificarsi periodi di mancanza di potenza causati da manutenzione dell'impianto, condizioni di emergenza, etc. potrebbe essere necessario un sistema tampone per generare energia (UPS).

Il convertitore, cuore dei nodi di distribuzione, deve essere progettato con la più alta efficienza possibile. Inoltre il sistema richiede un feedback per il controllo dei parametri di ingresso e uscita che si collegheranno al sistema di controllo dell'alimentazione a terra.

	PROGETTO NEMO ALLEGATO: POTENZA ELETTRICA, SISTEMA DI TRASFERIMENTO E DISTRIBUZIONE SUL FONDO	Data creazione 25-10-2001 15:22 Pagina 41 di 55 ALL-Distr_potenza-Rev-A.doc Rev:A
---	---	---

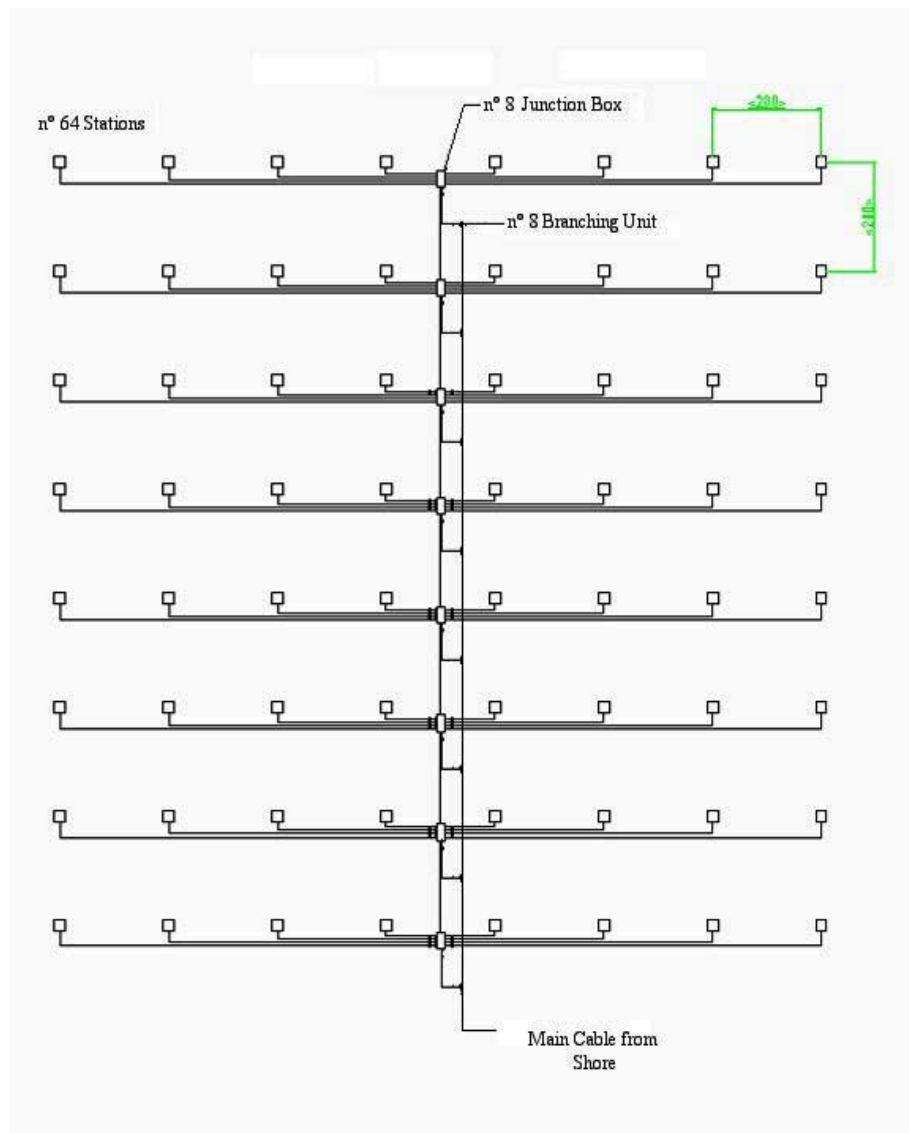


Fig. 13 Distribuzione della potenza elettrica e rete dei dati per il progetto Nemo

La Figura 13 riporta l'impianto di distribuzione che è stato previsto per il progetto Nemo, per la sua descrizione si rimanda al capitolo***. La maglia di distribuzione è stata concepita tenendo conto di eventuali interruzioni o malfunzionamenti sia dei conduttori elettrici che delle fibre ottiche associate. Come si evince dalla Figura 14 dal cavo principale viene effettuato un prelievo sia di potenza che di fibre ottiche per il trasferimento dei dati. Questo avviene tramite la connessione tra una Branching Unit (BU) e la relativa Junction Box (JB). Dalla JB si dipartono 8 cavi che forniranno

	PROGETTO NEMO ALLEGATO: POTENZA ELETTRICA, SISTEMA DI TRASFERIMENTO E DISTRIBUZIONE SUL FONDO	Data creazione 25-10-2001 15:22 Pagina 42 di 55 ALL-Distr_potenza-Rev-A.doc Rev:A
---	---	---

l'alimentazione e permetteranno il trasferimento dati dei rivelatori e della relativa strumentazione verso 8 gruppi di torri.

La successiva BU oltre a collegarsi alla relativa JB, per effettuare la connessione del successivo II° gruppo di 8 torri, permetterà in caso di guasti della prima via, tramite opportuna connessione, di gestire il I° gruppo di 8 torri. Quindi sarà realizzata una connessione anche fra JB il cui scopo è di avere sempre presenti più vie sia per l'alimentazione elettrica che per la trasmissione dei dati in modo da sopperire ad eventuali anomalie del sistema.

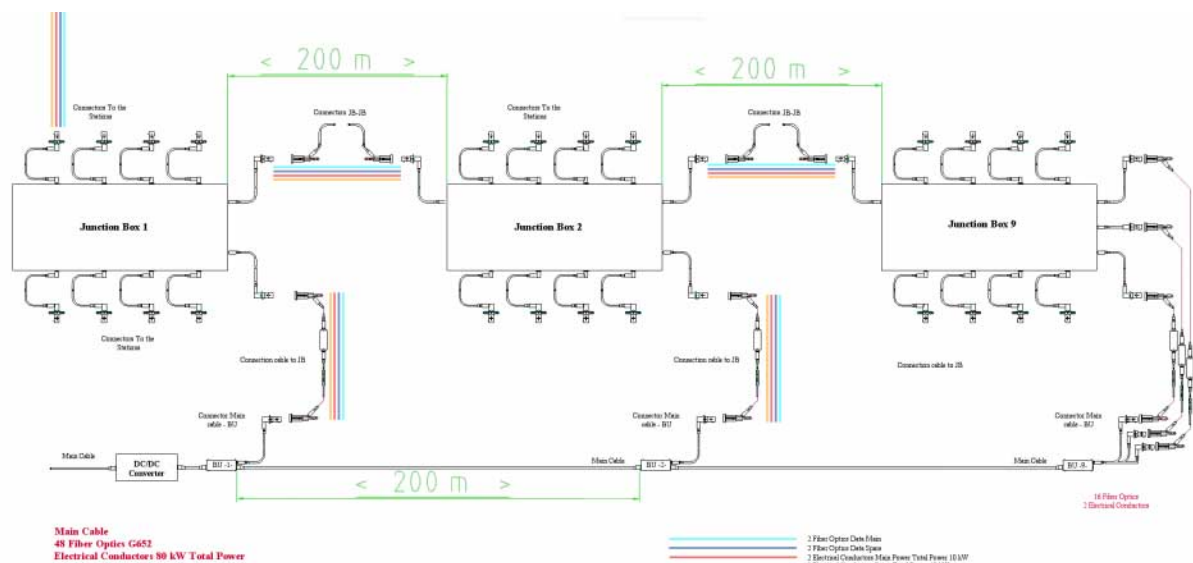


Fig. 14 Schema delle interconnessioni fra il cavo elettro-ottico principale e le Junction Box di distribuzione che connettono i rivelatori.

Nelle Figure 13 e 14 vengono mostrate

13.1 Switchgear and Topologies

	PROGETTO NEMO ALLEGATO: POTENZA ELETTRICA, SISTEMA DI TRASFERIMENTO E DISTRIBUZIONE SUL FONDO	Data creazione 25-10-2001 15:22 Pagina 43 di 55 ALL-Distr_potenza-Rev-A.doc Rev:A
---	---	---

La corrente continua è difficoltosa da interrompere e in particolar modo nel nostro caso dove esiste un problema legato alla scarica della capacità del cavo che è particolarmente elevata.

Per tale scopo necessita sviluppare un dispositivo in grado di forzare la corrente a zero utilizzando dell'energia immagazzinata, come da figura 14.

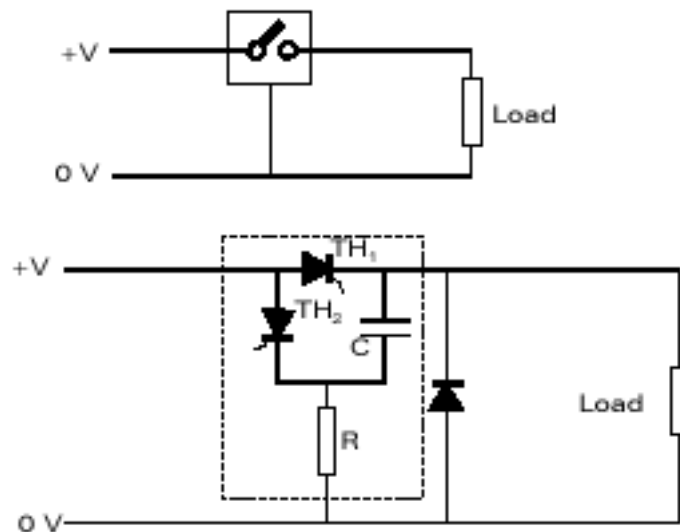


Fig. 14 Schema di principio di un interruttore a thyristor

In questa configurazione la chiusura dell'interruttore equivale all'innesco del thyristor TH1 applicando un impulso al suo gate. La capacità C è caricata dopo un certo tempo, attraverso il resistore R. Per spegnere il thyristor TH1 viene innescato il thyristor TH2 che scarica la tensione di C, azzerando di conseguenza la corrente e permette a TH1 di spegnersi. In questa configurazione è presente corrente sulla resistenza R fino a una nuova apertura dell'interruttore, quindi il sistema è inefficiente dal punto di vista della potenza.

	PROGETTO NEMO ALLEGATO: POTENZA ELETTRICA, SISTEMA DI TRASFERIMENTO E DISTRIBUZIONE SUL FONDO	Data creazione 25-10-2001 15:22 Pagina 44 di 55 ALL-Distr_potenza-Rev-A.doc Rev:A
---	---	--

13.2 Uninterruptible Power Supply

Il sistema, qualora dovessero verificarsi mancanze di energia, potrebbe prevedere un sistema tampone in grado di generare energia, pertanto è previsto l'utilizzo di dispositivi adatti.

13.3 Converter Design

Il convertitore sarà una sorgente di tensione realizzato tramite tecnologia switching. Un esempio tipico è mostrato in figura 15.

In questo schema l'ingresso è connesso all'uscita tramite un filtro passa basso e un elemento di switch. Se lo switch è ON, la tensione all'ingresso del filtro è uguale alla tensione di ingresso. Se lo switch è OFF, l'ingresso è connesso a terra. La funzione del filtro è di livellare la tensione; questa tensione viene utilizzata nel loop di feedback per controllare il rapporto ON/OFF dello switch attraverso un sistema PWM (Pulse Width Modulation). In pratica il sistema potrebbe essere in grado di funzionare anche per tensioni di ingresso molto elevate, da 1 a 10 kV

I dettagli di progetto così come, la scelta degli elementi per la realizzazione degli switch, la frequenza di switching, e l'implementazione del filtro passa basso, saranno determinati dalla realizzazione di un prototipo realizzato per soddisfare tutte le esigenze del convertitore del nodo.

	PROGETTO NEMO ALLEGATO: POTENZA ELETTRICA, SISTEMA DI TRASFERIMENTO E DISTRIBUZIONE SUL FONDO	Data creazione 25-10-2001 15:22 Pagina 45 di 55 ALL-Distr_potenza-Rev-A.doc Rev:A
---	---	---

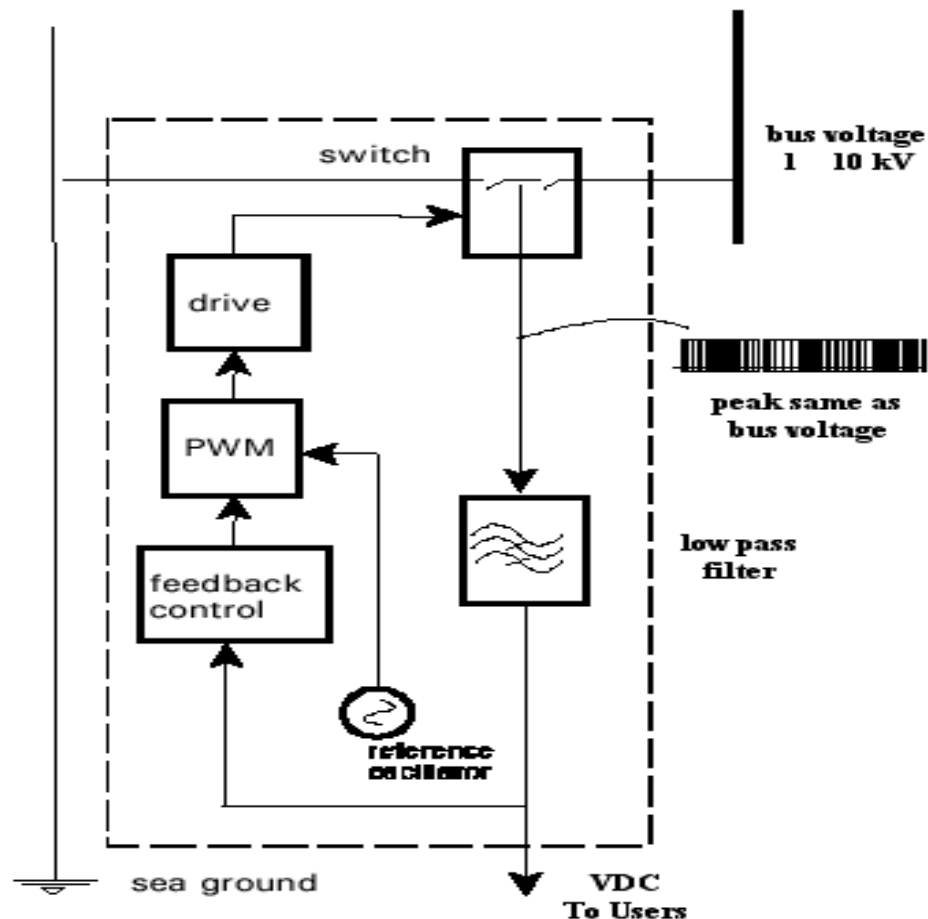


Fig. 15 Schema di principio di un convertitore DC/DC

13.4 Voltage Management

In questa sezione si vogliono affrontare i problemi dovuti all'alta tensione, qualora si utilizzasse la DC, a cui si troveranno i componenti, e quindi all'isolamento galvanico, e agli aspetti legati alla loro dissipazione termica.

	PROGETTO NEMO ALLEGATO: POTENZA ELETTRICA, SISTEMA DI TRASFERIMENTO E DISTRIBUZIONE SUL FONDO	Data creazione 25-10-2001 15:22 Pagina 46 di 55 ALL-Distr_potenza-Rev-A.doc Rev:A
---	---	--

Supponendo una tensione applicata al cavo di 10 kV l'hardware connesso si troverà alla medesima tensione, quindi è necessario che la componentistica venga scelta in modo da non subire stress.

Normalmente fra due conduttori piani posti in aria secca una distanza di 4 mm potrebbe essere sufficiente per 10 kV di isolamento. Quindi se da un lato pochi centimetri di distanza, dei componenti posti ad alta tensione, potrebbero essere sufficienti a garantire l'isolamento, dall'altro dal punto di vista termico, la soluzione potrebbe non essere adattabile.

Una soluzione utilizzabile, ove possibile, potrebbe essere l'utilizzo di olio, che offre dei vantaggi dal punto di vista della dissipazione termica.

Isolamenti solidi, come resine, in generale sono in grado di sostenere livelli di stress più alti rispetto all'aria. Questo sistema però presenta l'inconveniente di formazione di bolle d'aria all'interno, con conseguente calo delle prestazioni, e aumento dei test di qualità.

13.5 Control

Il convertitore, posto in ogni nodo, sarà dotato di un sistema di controllo tipo closed-loop che permette di mantenere la tensione di uscita stabile. Le cause che impongono questa scelta sono dovute:

- il carico all'uscita del convertitore può non essere costante
- la tensione di ingresso può non essere costante a causa dell'alta resistenza serie del cavo

Se la tensione a un nodo decresce a causa di un aumento del carico in un punto imprecisato del sistema, il nodo per controbilanciare risponderà richiedendo più

	PROGETTO NEMO ALLEGATO: POTENZA ELETTRICA, SISTEMA DI TRASFERIMENTO E DISTRIBUZIONE SUL FONDO	Data creazione 25-10-2001 15:22 Pagina 47 di 55 ALL-Distr_potenza-Rev-A.doc Rev:A
---	---	--

corrente. In ogni caso, vista dal lato generatore, questa tipologia di controllo presenta una resistenza incrementale negativa. Quindi occorrerà porre molta attenzione per assicurare una stabilità globale del sistema.

Mentre il progetto di tale sistema di controllo non presenta difficoltà insuperabili, nel suo insieme il sistema di controllo di Nemo presenta diverse difficoltà. Così come esso deve mantenere costante la tensione di uscita locale dei convertitori ai nodi, esso attraverso il sistema di comunicazione deve comunicare con il controllore principale della stazione a terra in maniera che la tensione di uscita sia la più appropriata.

In questo modo, se uno dei nodi del sistema vede la tensione locale d'ingresso troppo bassa per mantenere costante la sua tensione d'uscita, esso può richiedere un incremento della tensione di uscita sul cavo. Tutti gli altri nodi possono regolare di conseguenza. Questo sistema permette al controllore del generatore di mantenere la tensione sul cavo la più bassa possibile.

13.6 Load Management

La potenza disponibile ad ogni nodo sarà limitata al valore utile per i dispositivi connessi. Qualora uno dei dispositivi connessi presenta qualche anomalia tale da richiedere un incremento di potenza, il controllo deve intervenire per limitare tale richiesta. La decisione di sconnettere o alimentare a tensione più bassa il dispositivo sarà presa di volta in volta in funzione delle informazioni che il controllore fornirà.

Lo schema che potrebbe essere preso in considerazione per tale scopo può essere simile a un sistema di distribuzione elettrico per uso domestico dove un quadro suddivide la potenza d'ingresso in un certo numero di circuiti controllati.

	PROGETTO NEMO ALLEGATO: POTENZA ELETTRICA, SISTEMA DI TRASFERIMENTO E DISTRIBUZIONE SUL FONDO	Data creazione 25-10-2001 15:22 Pagina 48 di 55 ALL-Distr_potenza-Rev-A.doc Rev:A
---	---	---

13.7 Galvanic Isolation

Il convertitore posto su ogni nodo ha la proprietà di avere come riferimento per il suo ingresso e la sua uscita un Ground comune, verosimilmente l'acqua. Essi condividono il Ground attraverso lo switch e il filtro passa basso. La figura successiva mostra un modo possibile di isolare i due circuiti. Qualora richiesto, un isolamento galvanico può essere effettuato.

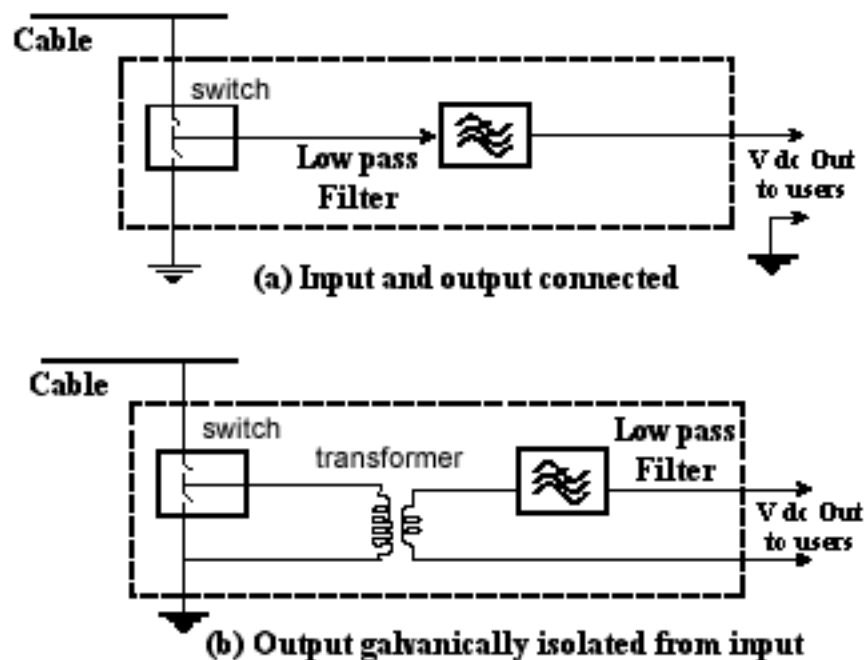


Fig. 16 Modello di principio di isolamento galvanico

	PROGETTO NEMO ALLEGATO: POTENZA ELETTRICA, SISTEMA DI TRASFERIMENTO E DISTRIBUZIONE SUL FONDO	Data creazione 25-10-2001 15:22 Pagina 49 di 55 ALL-Distr_potenza-Rev-A.doc Rev:A
---	---	--

13.8 Startup

All'inizio delle operazioni il sistema prevede una rampa di generazione della tensione al cavo principale. Quindi il sistema di controllo ai nodi all'inizio non è in funzione.

Esso sarà in funzione quando sarà presente un livello di tensione minimale. Questo si può ottenere in due modi:

- utilizzando il cavo principale che verrà energizzato con una rampa e arrestando la rampa a un livello minimale per effettuare lo start up del sistema, per poi proseguire con la rampa al livello massimo per energizzare tutto il sistema;
- creando una via ausiliaria per il sistema di controllo e lo start up.

Il sistema di alimentazione ai nodi deve essere configurato in modo self-starting e deve operare alla massima tensione del cavo sottomarino. Esso deve inoltre essere molto affidabile e progettato in modo da poter essere resettato da remoto.

13.9 Direct Current Measurement

La misura della tensione di alimentazione per i controllori locali è un parametro fondamentale. Tale misura potrà essere effettuata tramite un partitore resistivo opportunamente dimensionato. La misura della corrente presente non è altrettanto semplice. Consideriamo la situazione mostrata nella figura 17 seguente.

	PROGETTO NEMO ALLEGATO: POTENZA ELETTRICA, SISTEMA DI TRASFERIMENTO E DISTRIBUZIONE SUL FONDO	Data creazione 25-10-2001 15:22 Pagina 50 di 55 ALL-Distr_potenza-Rev-A.doc Rev:A
---	---	---

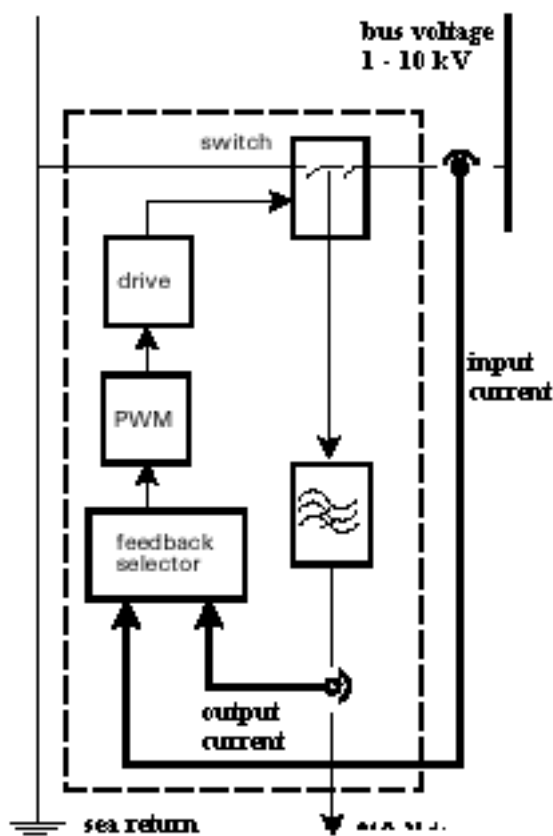


Fig. 17 Schema di principio per il controllo della corrente

Le due correnti di ingresso e di uscita sono misurate tramite un trasformatore di corrente equivalente. La ragione di questo circuito consiste nell'effettuare una misura isolando dalla tensione d'ingresso il segnale che si trova ad alto potenziale. Il segnale di corrente sarà ottenuto tramite un resistore serie e un circuito di isolamento.

	PROGETTO NEMO ALLEGATO: POTENZA ELETTRICA, SISTEMA DI TRASFERIMENTO E DISTRIBUZIONE SUL FONDO	Data creazione 25-10-2001 15:22 Pagina 51 di 55 ALL-Distr_potenza-Rev-A.doc Rev:A
---	---	--

14 Controlli e Protezioni

La realizzazione del sistema di trasferimento di potenza e dei dispositivi collegati non può prescindere dall'esecuzione di prototipi, analisi, collaudi e test di qualità. Si analizzano in questa sezione gli aspetti legati alla misura dei parametri elettrici, ai sistemi di protezione, e al controllo della potenza.

Per comodità esso è suddiviso in cinque parti:

- Sistemi di misura
- Sistemi di protezione
- Controllo e management della potenza
- Analisi e modelli
- Test di qualità

14.1 Metering

Molti dei parametri richiesti dal sistema di misura sono legati al funzionamento del sistema di controllo sia del generatore a terra che sul lato dei convertitori sul fondo. Il sistema prevede un uso di sensori opportunamente connessi alle varie parti del sistema. Essi preleveranno dati e informazioni relativi ai valori di tensione e di corrente, nonché il flusso di potenza necessari al monitoraggio dell'intero sistema, per consentire all'operatore di avere un quadro completo sul funzionamento dell'apparato e inoltre poter interagire con esso. Inoltre sia per scopi interni di servizio, che di utilità agli utenti, sarà resa disponibile in forma grafica lo stato dei carichi connessi. Pertanto sarà

	PROGETTO NEMO ALLEGATO: POTENZA ELETTRICA, SISTEMA DI TRASFERIMENTO E DISTRIBUZIONE SUL FONDO	Data creazione 25-10-2001 15:22 Pagina 52 di 55 ALL-Distr_potenza-Rev-A.doc Rev:A
---	---	---

necessario sviluppare un sistema di controllo per il prelievo dei dati incluso di sistema di immagazzinamento dati e rappresentazione grafica.

14.2 Protection

Spesso la presenza di guasti porta un sistema in condizioni anormali. Per uscire da questa condizione si realizzano dei sistemi di protezione che entrano in funzione al verificarsi di tali fenomeni. Questi generano un segnale che fanno aprire gli interruttori di alimentazione. Saranno adottati diversi livelli di protezione, alcuni dei quali possono intervenire autonomamente in caso di anomalie, mentre altri saranno gestiti dal sistema di controllo vedi Fig. 22 e 23.

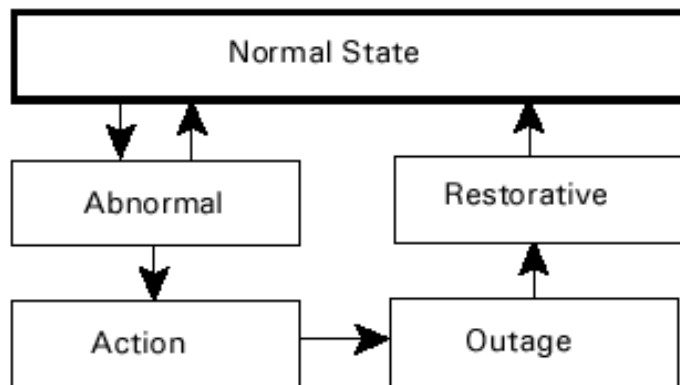


Fig. 22 Lo schema del sistema di protezione deve monitorare la distribuzione di potenza e può intervenire, tramite differenti stati, alla presenza di un'anomalia.

	PROGETTO NEMO ALLEGATO: POTENZA ELETTRICA, SISTEMA DI TRASFERIMENTO E DISTRIBUZIONE SUL FONDO	Data creazione 25-10-2001 15:22 Pagina 53 di 55 ALL-Distr_potenza-Rev-A.doc Rev:A
---	---	---

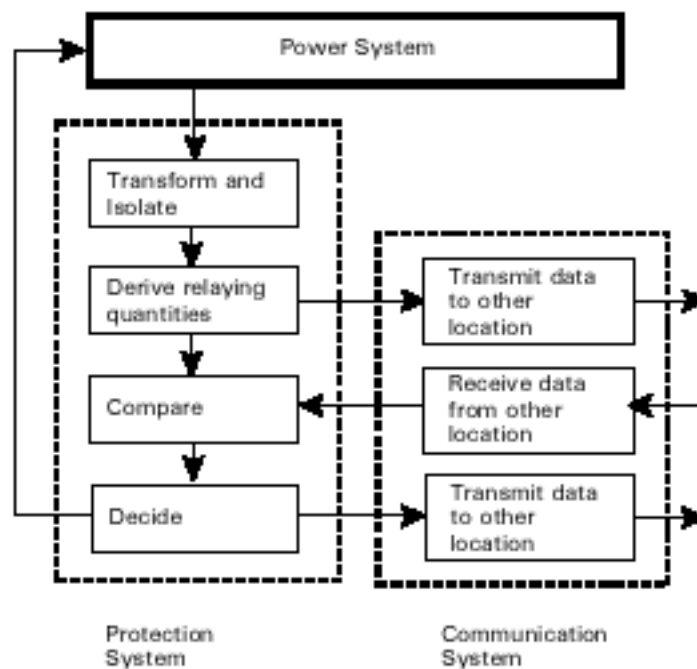


Fig. 23 Il sistema di protezione farà uso di valori di parametri sia locali che remoti e deciderà l'azione da prendere in funzione di criteri prestabiliti.

14.3 Power Management System

Il sistema di potenza deve essere in grado di funzionare autonomamente, cioè senza intervento dell'operatore, esso deve essere in grado, allo stesso tempo, di fornire informazioni all'operatore di sistema che potrebbe adottare delle modifiche al processo. Diversi livelli di supervisione e controllo, supportati da un sistema di acquisizione dei dati, sarà realizzato. Esso sarà integrato dai parametri previsti nel precedente 15.2 Protection.

	PROGETTO NEMO ALLEGATO: POTENZA ELETTRICA, SISTEMA DI TRASFERIMENTO E DISTRIBUZIONE SUL FONDO	Data creazione 25-10-2001 15:22 Pagina 54 di 55 ALL-Distr_potenza-Rev-A.doc Rev:A
---	---	--

14.4 Model and Analysis

La complessità del sistema di potenza richiederà la sua simulazione tramite modelli e sistemi di analisi per verificarne le performance. Software per tali scopi potrebbero essere basati su pacchetti esistenti come MATLAB e PSPICE. Gli studi dovrebbero includere i flussi di potenza, i corto circuiti (transienti) e le considerazioni sulla stabilità. Gli studi saranno integrati inoltre della simulazione del sistema di controllo così come del sistema di protezione.

14.5 Quality Assurance and Testing

Il fattore maggiore nella progettazione di un progetto con operabilità a lungo tempo come Nemo si deve basare sull'affidabilità dei suoi componenti. In quanto le riparazioni e le sostituzioni durante il funzionamento sono molto costose. Pertanto è necessario ridurre le operazioni di intervento successive tramite opportune progettazioni e test di qualità.

Il processo di qualità e controllo può essere suddiviso in tre parti:

- 1 Il progetto deve essere ben valutato dal punto di vista del suo adattamento ambientale. Ogni punto debole o singolo punto di possibili anomalie deve essere identificato e il sistema modificato di conseguenza.
- 2 I componenti scelti per il progetto devono essere ben valutati. Ogni componente dovrà essere valutato alla luce della sua applicazione: temperatura, pressione, umidità, suscettibilità alle vibrazioni etc.

	PROGETTO NEMO ALLEGATO: POTENZA ELETTRICA, SISTEMA DI TRASFERIMENTO E DISTRIBUZIONE SUL FONDO	Data creazione 25-10-2001 15:22 Pagina 55 di 55 ALL-Distr_potenza-Rev-A.doc Rev:A
---	---	--

- 3 Test di qualità sui componenti o su intere parti del sistema, prima della produzione, devono poter essere effettuati.

Dato che effettuare un test di tutto il progetto potrebbe rivelarsi estremamente costoso, saranno effettuati dei test, ricreando opportunamente le condizioni di funzionamento finale, sui componenti cruciali del sistema che saranno considerati essenziali.

14.6 Prototype Development

La progettazione del sistema culminerà nella realizzazione di prototipi che possono essere testati presso il Test Site dei LNS. Questo paragrafo integra quanto detto nel precedente. La realizzazione di prototipi consiste in contenitori a pressione che alloggeranno i dispositivi citati in questo documento, il cavo e i relativi sistemi di connessione. Inoltre saranno presi in considerazione gli aspetti legati al diretto impatto dei contenitori alla pressione come effetti di corrosione, effetti di dissipazione termica, progettazione meccanica etc.