

PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO PER LA
PRODUZIONE DI ENERGIA MEDIANTE LO SFRUTTAMENTO DEL VENTO
NEL TERRITORIO COMUNALE DI TORCHIAROLO (BR) IN LOC. VALESIO (BR)
POTENZA NOMINALE 50,4 MW

PROGETTO DEFINITIVO - SIA

PROGETTAZIONE E SIA

ing. Fabio PACCAPELO

ing. Andrea ANGELINI

ing. Antonella Laura GIORDANO

ing. Francesca SACCAROLA

COLLABORATORI

ing. Giulia MONTRONE

geom. Rosa CONTINI

STUDI SPECIALISTICI

GEOLOGIA

geol. Matteo DI CARLO

ACUSTICA

ing. Antonio FALCONE

STUDIO FAUNISTICO

dott. nat. Fabio MASTROPASQUA

VINCA, STUDIO BOTANICO VEGETAZIONALE

E PEDO-AGRONOMICO

dr.ssa Lucia PESOLA

ARCHEOLOGIA

dr.ssa archeol. Domenica CARRASSO

INTERVENTI DI COMPENSAZIONE E VALORIZZAZIONE

arch. Gaetano FORNARELLI

arch. Andrea GIUFFRIDA

PD.R. ELABORATI DESCRITTIVI

R.10 Relazione specialistica Opere Elettriche

REV. DATA DESCRIZIONE

REV.	DATA	DESCRIZIONE



INDICE

1	INTRODUZIONE	1
2	NORMATIVE E DOCUMENTAZIONE DI RIFERIMENTO	2
3	DATI PRINCIPALI	3
3.1	DESCRIZIONE SINTETICA DEL SISTEMA ELETTRICO	3
3.2	DATI RELATIVI ALLE CONDIZIONI AMBIENTALI	3
3.3	DATI ELETTRICI GENERALI DEL SISTEMA	4
3.4	DATI CARATTERISTICHE ELETTRICHE DEI COMPONENTI DELL'IMPIANTO	4
4	SISTEMA DI ACCUMULO ENERGIA BESS	5
4.1	IL PCS	5
4.2	DISPOSIZIONE INTERNA	7
5	CABINA DI RACCOLTA MT	7
5.1	DESCRIZIONE	7
5.2	LOCALE MISURE	7
5.3	COLLEGAMENTI AUSILIARI	7
5.4	APPARECCHIATURE A MT	8
5.5	QUADRO GENERALE MT	8
5.6	SERVIZI AUSILIARI ESSENZIALI	8
5.7	RETE DI TERRA	8
5.8	IMPIANTI SPECIALI	8
6	CABINA DI VETTORIAMENTO MT	9
6.1	DESCRIZIONE	9
6.2	COLLEGAMENTI AUSILIARI	9
6.3	APPARECCHIATURE A MT	9
6.4	QUADRO GENERALE MT	9
6.5	RETE DI TERRA	9
6.6	IMPIANTI SPECIALI	10
7	CALCOLI	11
7.1	MODALITÀ DI CALCOLO	11
7.2	CALCOLO DELLA PORTATA	11
7.3	SCELTA DEL TIPO DI POSA CAVO MT	13
7.4	SCELTA DEL LIVELLO DI TENSIONE E DEL TIPO DI CAVO	13
7.5	RISULTATI	15
7.6	CONDIZIONI OPERATIVE E VINCOLI	16



1 INTRODUZIONE

Il presente documento ha lo scopo di definire la metodologia e i calcoli preliminari degli impianti elettrici relativi alla costruzione del parco eolico posizionato in un'area agricola nel territorio comunale di Torchiarolo, San Pietro Vernotico e Cellino San Marco (BR), della potenza complessiva di 50,4 MW.

Si dimensioneranno le apparecchiature MT e le sezioni dei cavi MT e i relativi criteri per i sistemi di protezione. In particolare i calcoli per il dimensionamento dei cavi sarà effettuato confrontando le correnti di impiego ricavate da calcoli di load flow con la portata limite del cavo in funzione del suo regime termico di funzionamento e delle sue condizioni di installazione (temperatura ambiente, modalità di posa, loro raggruppamento e resistività termica del terreno ecc.) tale da ottenere perdite inferiori al 2% sulla linea di vettoriamento, margine di sicurezza sulla portata superiore al 15% ed una caduta di tensione al massimo del 4%.



2 NORMATIVE E DOCUMENTAZIONE DI RIFERIMENTO

Per la redazione della presente relazione sono stati utilizzati i seguenti documenti di riferimento:

- Norme CEI CEI 99-2, 11-17 e 20-21 (equivalenti a IEC 60287);
- Catalogo e documentazione tecnica PRYSMIAN, Nexans cavi ecc.;
- Varia letteratura e documentazione tecnica;
- DPR 547 del 27/04/1955;
- High voltage XLPE Cable systems-technical user Guide Brugg;
- XLPE Cable systems – user’s guide ABB;
- Electrical power system – C.L Wadhawa;
- Impianti di terra – Cataliotti – Campoccia;
- Documentazione Enel: 3.3 esecuzione del giunto di isolamento dei cavi MT in uscita dalle cabine primarie – 2.8 componenti per la messa a terra – 1.3 giunti e connettori.



3 DATI PRINCIPALI

3.1 DESCRIZIONE SINTETICA DEL SISTEMA ELETTRICO

La costruzione della centrale eolica con sistema di accumulo di energia e delle relative opere connesse interesserà i comuni di Torchiarolo, San Pietro Vernotico e Cellino San Marco (BR). La centrale è costituita da 7 aerogeneratori aventi una potenza nominale di 7200 kW, per una potenza complessiva installata di 50,4 MW. Sarà installato nei pressi della cabina di raccolta e della torre TR06 anche un sistema di accumulo elettrochimico di energia di potenza pari a 18 MW, che sarà utilizzato per immettere energia elettrica in rete utile alla regolazione e stabilità del sistema elettrico della RTN.

Più in dettaglio, la centrale sarà costituita da:

- N. 7 aerogeneratori da 7200 kW di potenza nominale suddivisi in cinque sottocampi;
- cabina elettrica di raccolta MT;
- un elettrodotto di vettoriamento costituito da 4 terne di cavi interrati in media tensione a 36 kV;
- sistema di accumulo elettrochimico di energia di potenza pari a 18 MW e 72 MWh di accumulo.

I 7 aerogeneratori saranno collegati in “entra-esce” attraverso i quadri MT inseriti a base palo di ciascun generatore, mediante linee in cavo interrato a 36 kV e verranno suddivisi in 3 sottocampi di produzione che raccoglieranno la potenza prodotta e si attesteranno sulle sbarre del quadro MT della cabina di raccolta prevista nei pressi del parco eolico.

Tale soluzione è stata adottata al fine di limitare la potenza sulle linee in arrivo dal campo eolico alla sottostazione e la perdita di produzione di energia nel caso di fuori servizio di un gruppo e per evitare sprechi di materiale.

La suddivisione dei gruppi di sottocampo sarà la seguente:

- Sottocampo 1: TR02 – TR01 – TR07 – CR;
- Sottocampo 2: TR03 – TR05 – TR04 – CR;
- Sottocampo 3: TR06 – CR;

Il sistema di accumulo di energia sarà costituito da 36 container batteria ognuno di capacità di accumulo da 2 MWh e collegati ad un quadro di parallelo DC LV PANEL per essere poi collegati agli inverter ibridi posizionati a monte del DC PANEL. I container sono disposti ed assemblati per dare una potenza complessiva pari a 18 MW. Gli inverter BT a 800 V saranno collegati a 3 trasformatori da 6,8 MVA.

3.2 DATI RELATIVI ALLE CONDIZIONI AMBIENTALI

Altezza sul livello del mare	<1000m
Temperatura ambiente	-5 + 40°C
Temperatura media	25°C
Umidità relativa	90%
Inquinamento	leggero
Tipo di atmosfera	non aggressiva



3.3 DATI ELETTRICI GENERALI DEL SISTEMA

Sistema:	trifase
Frequenza:	50 Hz
Numero di fasi:	3
Tensione nominale	36 kV
Tipo di messa a terra del neutro	isolato

3.4 DATI CARATTERISTICHE ELETTRICHE DEI COMPONENTI DELL'IMPIANTO

Di seguito si riportano i dati caratteristici degli elementi costituenti l'impianto che sono stati utilizzati nei calcoli. In particolare, nelle tabelle seguenti si riportano i dati relativi a:

- rete Terna;
- generatori asincroni (aerogeneratori);
- trasformatori MT/BT;

Rete	
Un [kV]	36

Tabella 1 - dati rete Terna

Generatore asincrono		Trasformatore MT/BT	
Un [kV]	0.69/6	Un1 [kV]	36
Pn [MW]	7,2	Un2 [kV]	0.69
Efficiency	0.98	Sr [MVA]	9 (AF)
Cos φ	0.95	Ukr [%]	6

Tabella 2 – dati generatore asincrono e trasformatore MT/BT



4 SISTEMA DI ACCUMULO ENERGIA BESS

La tecnologia più promettente, per le applicazioni di accumulo distribuito di taglia medio-grande, è quella delle batterie agli ioni di litio che presenta una vita attesa molto lunga (fino a 5000 cicli di carica/ scarica a DOD 80%), un rendimento energetico significativamente alto (generalmente superiore al 90%) con elevata energia specifica. Esse sono adatte ad applicazioni di potenza, sia tradizionali, sia quelle a supporto del sistema elettrico. Le caratteristiche delle batterie litio-ioni in termini di prestazioni relative alla potenza specifica, energia specifica, efficienza e durata, rendono queste tecnologie di accumulo particolarmente interessanti per le applicazioni “in potenza” e per il settore automotive.

Nel caso specifico saranno utilizzati accumulatori a ioni di litio (LFP: litio-ferro-fosfatato) che permettono di ottenere elevate potenze specifiche in rapporto alla capacità nominale.

Le batterie sono alloggiare all'interno di container e sono raggruppate in stringhe. Le stringhe vengono messe in parallelo e associate a ciascun PCS attraverso un Box di parallelo che consente l'interfaccia con il PCS.

Le batterie sono di tipo ermetico e sono in grado di resistere, ad involucro integro, a sollecitazioni termiche elevate ed alla fiamma diretta. Esse non costituiscono aggravio al carico di incendio.

Di seguito si riportano i dati della singola cella:



Battery Pack		
General		
Model	LUNA2000-2.0MWH-1H0	LUNA2000-2.0MWH-2H1
Cell Material	LFP	LFP
Pack Configuration	16S 1P	18S 1P
Rated Voltage	51.2 V	57.6 V
Nominal Capacity	320 Ah / 16.38 kWh	280 Ah / 16.13 kWh
Supported Charge & Discharge Rate	≤ 1 C	≤ 0.5 C
Weight	≤ 140 kg	≤ 140 kg
Dimensions (W x H x D)	442 x 307 x 660 mm	442 x 307 x 660 mm

Le celle sono collegate in serie (16 oppure 18) per raggiungere la tensione massima in corrente continua al PCS (inverter bidirezionali CC/CA) ed in parallelo per raggiungere la potenza e la capacità di progetto (2 MWh per Container).

4.1 IL PCS

Il PCS (Power Conversion System), oltre alle batterie di accumulo elettrochimico, è un componente fondamentale per il sistema di accumulo, esso fa da “ponte” tra gli accumulatori e la rete elettrica.

Il PCS serve per controllare e gestire i flussi bidirezionali di energia permettendo alle batterie di caricarsi o scaricarsi secondo le diverse esigenze, attraverso le conversioni AC/DC e viceversa.

Il PCS nel caso specifico sarà formato da 5 inverter bidirezionali montati su un BOX DC di parallelo dove il lato CC sarà collegato alle batterie e l'altra parte in AC sarà collegata al quadro di parallelo BT prima della trasformazione BT/MT e il collegamento alla rete.



		LUNA2000-200KTL-H0	
		Technical Specifications	
		Efficiency	
		Max. Efficiency	99.0%
		DC Side	
		Rated DC Voltage	1,180 V
		Max. DC Voltage	1,500 V
		Operating DC Voltage Range	1,180 V - 1,500 V
		Max. DC Current	207.6 A
		Max. Number of Inputs	1
		AC Side	
		Rated AC Active Power	200,000 W @40°C
		Rated AC Voltage	800 V
		Rated AC Grid Frequency	50 Hz / 60 Hz
		Max. AC Current	373.2 A
		Adjustable Power Factor Range	-1 ... +1
		Max. Total Harmonic Distortion	<3%
		Protection	
		Anti-islanding Protection	Yes
		AC Overcurrent Protection	Yes
		DC Reverse-polarity Protection	Yes
		Insulation Resistance Detection	Yes
		Residual Current Protection	Yes
		DC Surge Protection ¹	Type II
		AC Surge Protection ¹	Type II
		Communication	
		Display	LED Indicators, WLAN + APP
		USB	Yes
		Ethernet	Yes
		General	
		Dimensions (W x H x D)	875 x 820 x 365 mm
		Weight	< 95 kg
		Operating Temperature Range	-25°C - 60°C
		Cooling Method	Smart Air Cooling
		Max. Operating Altitude without Derating	4,000 m
		Relative Humidity	0 - 100%
		DC Connector	OT/DT Terminal
		AC Connector	OT/DT Terminal
		Protection Degree	IP66
		Topology	Transformerless

Electrical	
Max. Input Voltage	1,500 V
Nominal Input Voltage	1,200 V
Max. Branch Current for Battery Rack Side	321 A
Max. Branch Current for PCS Side	193 A
Number of DC Circuit Breaker	14
Max. Input Number of Battery Rack	5
Max. Input Number of PCS	5
Max. Convergence Capacity	5 x 193 A

Protection	
DC Overcurrent Protection	Yes

Environment	
Operating Temperature Range	-30°C - 60°C
Relative Humidity	0 - 100%
Max. Operating Altitude	4,000 m

General	
Cable Entries	Top in for PCS & Bottom in for Battery Rack
Dimensions (W x H x D)	2,040 x 1,415 x 975 mm
Weight (Without Smart PCS)	≤ 750 kg
DC Connector / AC Connector	OT Terminal
Protection Degree	IP55
Installation Options	Grounding

Dati PCS con n. 5 inverter

Dati Inverter

LUNA2000-2.0MWH-1H0/2H1
 Smart String ESS



More Energy



Optimal Investment



Simple O&M



Safe & Reliable

Battery Container		
Model	LUNA2000-2.0MWH-1H0	LUNA2000-2.0MWH-2H1
DC Rated Voltage	1,200 V	1,250 V
DC Max. Voltage	1,500 V	1,500 V
Nominal Energy Capacity	2,064 kWh	2,032 kWh
Rated Power	344 kW * 6	338.7 kW * 3
Container Configuration (W x H x D)	6,058 x 2,896 x 2,438 mm	6,058 x 2,896 x 2,438 mm
Container Weight	≤ 30 t	≤ 30 t
Operation Temperature Range	-30°C - 55°C	-30°C - 55°C
Storage Temperature Range	-40°C - 60°C	-40°C - 60°C
Operation Humidity Range	0 - 100% (Without Condensation)	0 - 100% (Without Condensation)
Max. Operating Altitude	4,000 m	4,000 m
Cooling Method	Smart Air Cooling	Smart Air Cooling
Configuration of HVAC	8 HVACs	6 HVACs
Fire Suppression Agent	FM-200 / Novec 1230™	FM-200 / Novec 1230™
Communication Interface	Ethernet / SFP	Ethernet / SFP
Communication Protocol	Modbus TCP / IEC104	Modbus TCP / IEC104
Protection Degree	IP55	IP55
Certificates (more available upon request)		
Environment	RoHS6	
Safety & Electrical	IEC62477-1, IEC62040-1, IEC61000-6-2, EN55011, UL9540A, IEC62619, UN3536, etc.	

Dati Accumulo Container



4.2 DISPOSIZIONE INTERNA

L'impianto di accumulo sarà costituito da 36 Container Batteria ognuno di capacità pari a 2 MWh, disposti ed assemblati per dare una potenza complessiva pari a 18 MW.

In particolare, si formeranno 3 piazzole composte ciascuna da 1 trasformatore da 6,8 MVA e 18 PCS formati ognuno da 5 inverter da 200 kW di potenza da 1 MW dove saranno collegati 36 container accumulo. Tali container saranno distribuiti sui 18 PCS.

5 CABINA DI RACCOLTA MT

5.1 DESCRIZIONE

Sarà prevista, nei pressi dell'aerogeneratore denominato TR06 una cabina di raccolta MT atta a raccogliere l'energia prodotta dai gruppi dell'impianto eolico per vettorarla con 4 terne di cavi MT a 36 kV interrati verso la SE RTN.

La Cabina di Raccolta a MT sarà composta da:

- locale MT
- locale BT
- locale gruppo elettrogeno;
- locale per misure
- locale aerogeneratori;

La cabina sarà formata da un unico corpo, suddiviso in modo tale da contenere i quadri MT di raccolta, gli apparati di teleoperazione le batterie, i quadri B.T. in c.c. e c.a. per l'alimentazione dei servizi ausiliari e i contatori di produzione.

La costruzione potrà essere o di tipo tradizionale con struttura in c.a. e tamponature in muratura di laterizio rivestite con intonaco di tipo civile oppure di tipo prefabbricato (struttura portante costituita da pilastri prefabbricati in c.a.v., pannelli di tamponamento prefabbricati in c.a., finitura esterna con intonaci al quarzo). La copertura a tetto piano, sarà opportunamente coibentata ed impermeabilizzata.

Gli infissi saranno realizzati in alluminio anodizzato naturale.

Particolare cura sarà osservata ai fini dell'isolamento termico impiegando materiali isolanti idonei in funzione della zona climatica e dei valori minimi e massimi dei coefficienti volumici globali di dispersione termica, nel rispetto delle norme di cui alla Legge n. 373 del 04/04/1975 e successivi aggiornamenti nonché alla Legge n. 10 del 09/01/1991 e successivi regolamenti di attuazione.

5.2 LOCALE MISURE

Una piccola parte del fabbricato con accesso da strada sarà adibito a locale misure. All'interno saranno posizionati i contatori per contabilizzare tutta l'energia prodotta e l'energia consumata dai servizi ausiliari.

5.3 COLLEGAMENTI AUSILIARI

Per i collegamenti ausiliari si utilizzeranno cavi multipolari con conduttori in corda flessibile in rame isolato in EPR sotto guaina in PVC, tipo F16OR16 0.6/1 kV, in ottemperanza alle norme CEI 20-22 II, con sezione minima pari a 2,5 mmq. Per il collegamento lato secondario certificato UTF dei trasformatori di corrente la sezione minima dei cavi impiegati dovrà essere almeno pari a 4 mmq.



Tutta la cavetteria dei circuiti di misura dei TA e TV dovrà essere realizzata in cavo schermato per una migliore protezione dalle interferenze elettromagnetiche.

5.4 APPARECCHIATURE A MT

La sezione a MT sarà composta da scomparti per arrivi linea, per partenza verso la cabina di vettoriamento, per protezione linea servizi ausiliari, per protezione del TV di sbarra;

5.5 QUADRO GENERALE MT

Il quadro generale MT, del tipo a tenuta d'arco interno, è realizzato in lamiera zincata con unità separate protette con interruttori e sezionatori in SF₆, e sarà composto da:

- N. 4 unità di protezione partenza linea di vettoriamento verso RTN;
- N. 1 unità di alimentazione servizi ausiliari;
- N. 3 unità di arrivo linee MT da impianto eolico con protezione.
- N. 2 unità di arrivo linee MT da impianto storage con protezione
- N. 1 unità di prelievo segnali di tensione di sbarra.

5.6 SERVIZI AUSILIARI ESSENZIALI

Il sistema di distribuzione sarà così composto:

- Raddrizzatore/Caricabatteria;
- Batteria ermetica di accumulatori al piombo;
- Quadro BT servizi ausiliari.

Il raddrizzatore/caricabatteria svolge la duplice funzione di fornire l'alimentazione stabilizzata alle utenze a 110 V_{cc} e contemporaneamente di ricaricare la batteria.

5.7 RETE DI TERRA

La rete di terra sarà realizzata mediante anello in corda di rame nuda. L'impianto di terra sarà costituito, conformemente alle prescrizioni della CEI EN 50522 (Classificazione CEI 99-3) ed alle prescrizioni della Guida CEI 11-37, da un anello realizzata con conduttori nudi in rame elettrolitico di sezione pari a 50 mm², interrato ad una profondità di almeno 0.7 m. Per le connessioni agli armadi verranno impiegati conduttori di sezione pari a 35 mm².

5.8 IMPIANTI SPECIALI

La cabina di raccolta MT sarà protetta dall'ingresso di non autorizzati tramite un sistema di antintrusione, conforme alla CEI 79-2, composto da:

- barriere perimetrali sui quattro lati del perimetro del fabbricato
- contatti sulle porte di accesso ai locali, con eccezione del locale misure;
- sirena auto-alimentata antischiama;
- centrale elettronica di allarme con almeno 4 zone;
- trasponder o chiave elettronica con interfaccia presso il cancello di ingresso;
- compositore GSM;



6 CABINA DI VETTORIAMENTO MT

6.1 DESCRIZIONE

Sarà prevista, nei pressi della Stazione Elettrica RTN, una cabina di vettoriamento MT atta a sezionare il cavidotto di vettoriamento e ridurre il numero di terne di cavi in ingresso alla Stazione elettrica RTN passando da 4 cavi tripolari MT a 36 kV a due terne di cavi unipolari in conformità alle specifiche previste da TERNA.

La cabina di vettoriamento sarà formata da un unico corpo corrispondente al locale MT.

La costruzione potrà essere po' di tipo tradizionale con struttura in c.a. e tamponature in muratura di laterizio rivestite con intonaco di tipo civile oppure di tipo prefabbricato (struttura portante costituita da pilastri prefabbricati in c.a.v., pannelli di tamponamento prefabbricati in c.a., finitura esterna con intonaci al quarzo). La copertura a tetto piano, sarà opportunamente coibentata ed impermeabilizzata.

Gli infissi saranno realizzati in alluminio anodizzato naturale.

Particolare cura sarà osservata ai fini dell'isolamento termico impiegando materiali isolanti idonei in funzione della zona climatica e dei valori minimi e massimi dei coefficienti volumici globali di dispersione termica, nel rispetto delle norme di cui alla Legge n. 373 del 04/04/1975 e successivi aggiornamenti nonché alla Legge n. 10 del 09/01/1991 e successivi regolamenti di attuazione.

6.2 COLLEGAMENTI AUSILIARI

Per i collegamenti ausiliari si utilizzeranno cavi multipolari con conduttori in corda flessibile in rame isolato in EPR sotto guaina in PVC, tipo F16OR16 0.6/1 kV, in ottemperanza alle norme CEI 20-22 II, con sezione minima pari a 2,5 mmq. Per il collegamento lato secondario certificato UTF dei trasformatori di corrente la sezione minima dei cavi impiegati dovrà essere almeno pari a 4 mmq.

Tutta la cassetteria dei circuiti di misura dei TA e TV dovrà essere realizzata in cavo schermato per una migliore protezione dalle interferenze elettromagnetiche.

6.3 APPARECCHIATURE A MT

La sezione a MT sarà composta da scomparti per arrivi linea dalla cabina di vettoriamento e per partenza verso la Stazione Elettrica RTN.

6.4 QUADRO GENERALE MT

Il quadro generale MT, del tipo a tenuta d'arco interno, è realizzato in lamiera zincata con unità separate protette con interruttori e sezionatori in SF₆, e sarà composto da:

- N. 2 unità di protezione partenza linea di vettoriamento verso RTN;
- N. 4 unità di arrivo linee MT da cabina di raccolta.

6.5 RETE DI TERRA

La rete di terra sarà realizzata mediante anello in corda di rame nuda. L'impianto di terra sarà costituito, conformemente alle prescrizioni della CEI EN 50522 (Classificazione CEI 99-3) ed alle prescrizioni della Guida CEI 11-37, da un anello realizzata con conduttori nudi in rame elettrolitico di sezione pari a 50 mm², interrato ad una profondità di almeno 0.7 m. Per le connessioni agli armadi verranno impiegati conduttori di sezione pari a 35 mm².



6.6 IMPIANTI SPECIALI

La cabina di raccolta MT sarà protetta dall'ingresso di non autorizzati tramite un sistema di antintrusione, conforme alla CEI 79-2, composto da:

- barriere perimetrali sui quattro lati del perimetro del fabbricato
- contatti sulle porte di accesso ai locali, con eccezione del locale misure;
- sirena auto-alimentata antischiuma;
- centrale elettronica di allarme con almeno 4 zone;
- trasponder o chiave elettronica con interfaccia presso il cancello di ingresso;
- compositore GSM;



7 CALCOLI

7.1 MODALITÀ DI CALCOLO

Partendo dalla modellazione del sistema con i parametri dei generatori, dei trasformatori, si introducono i parametri dei cavi e si risolve il problema del load flow con il metodo di Newton – Raphson utilizzando un software proprietario e si verifica se sono rispettati i vincoli imposti sulla portata, caduta di tensione, perdite di potenze, etc.

Il processo è iterativo, nel senso che se uno dei vincoli non è rispettato si maggiora la sezione dei cavi, e si risolve di nuovo il problema.

Questa operazione sarà ripetuta fino a quando tutti i vincoli saranno rispettati.

Per la scelta delle caratteristiche delle apparecchiature elettriche e per la scelta definitiva dei cavi, si risolve il problema del corto circuito con la norma IEC 60909/2001 equivalente alla norma CEI 11-25, sulla rete precedentemente modellata (con i cavi che rispettano tutti i vincoli imposti).

Risolto il problema del corto circuito, si verifica se tutti i cavi precedentemente scelti, sono in grado di sostenere la corrente presunta di corto circuito per 0,5 secondi. Se si verifica che una data linea non è in grado di sostenere il corto circuito, si maggiora la sezione e si procede di nuovo alla verifica, il tutto fino a quando i risultati sono coerenti.

7.2 CALCOLO DELLA PORTATA

Una delle principali caratteristiche funzionali dei cavi interrati è la portata nominale al limite termico I_n , intesa come la massima intensità di corrente che può circolare in un conduttore, in condizioni di servizio, senza che la temperatura sia superiore a quella massima ammissibile θ_{max} dell'isolante. Ovviamente questo valore di temperatura varierà a seconda delle caratteristiche dielettriche dell'isolante impiegato e, di conseguenza, la corrente che può circolare nel conduttore dipende fortemente dal tipo di isolante adoperato che, come precedentemente osservato, è la parte più sensibile alle sollecitazioni elettriche e termiche.

Considerando che il cavo è isolato in XLPE (polietilene reticolato), oppure in E4 o in P1 la temperatura massima ammissibile per l'isolante vale:

$\theta_{max}=90^\circ$ (caso peggiorativo)

Un altro parametro termico da tener presente è la temperatura dell'ambiente di posa del cavo, che varia a seconda delle sue condizioni di posa e, per ciascuna di esse, tiene conto della situazione ambientale più sfavorevole allo smaltimento del calore. In particolare, si è scelto:

$\theta_{amb}=20^\circ$ (come previsto dalla CEI 20-21 per l'Italia)

quale temperatura del terreno di posa.

Si definisce salto termico totale $\Delta\theta_{tot}$ la quantità (funzione della portata I_n):

$$\Delta\theta_{tot}=\theta_{max} - \theta_{amb}=f(I)$$

Il salto termico totale è un limite di temperatura che non deve essere superato. Infatti, la trasmissione di elevati valori di energia elettrica comporta notevoli difficoltà legate, oltre che al tipo di isolante e alle dimensioni del cavo, anche al modo in cui il calore viene smaltito all'esterno. Inoltre, la vita dell'isolante, intesa come l'intervallo di tempo durante il quale il cavo può esercitare le funzioni per le quali è stato realizzato, cala bruscamente se il salto termico totale viene superato.

Assegnato $\Delta\theta_{tot}$, lo scopo del progetto termico è quello di determinare la portata massima ammissibile I_n del cavo. Per determinare la portata I_n occorre valutare l'intera potenza che si dissipa all'interno del cavo (ovvero la potenza termica che si genera al suo interno per effetto dei diversi fenomeni di perdita che hanno sede nei vari strati). Nota la potenza termica, sarà possibile valutare i salti di temperatura $\Delta\theta$ relativi a ogni strato di cui



è composto il cavo. A ciascun elemento del cavo, infatti, compete un diverso salto di temperatura, oltre che una diversa potenza dissipata, e la somma di questi $\Delta\theta$ non dovrà superare $\Delta\theta_{tot}$.

Il progetto termico viene effettuato facendo riferimento alla norma tecnica Norma CEI 20-21, in modo tale da determinare la portata in regime permanente in funzione della temperatura ambiente e modalità di posa. Le elaborazioni di calcolo ed i risultati sono ottenuti, come riportato dalle tabelle sotto riportate, utilizzando la procedura indicata dalla norma:

$$I=[\Delta\theta_{tot}-Wd(0,5T_1+n(T_2+T_3+T_4))/(RT_1+nR(1+\lambda_1)T_2+nR(1+\lambda_1+\lambda_2)(T_3+T_4))]^{1/2}$$

dove:

- $Wd=\omega C U_2 \tan\delta$ (perdite dell'isolante per unità di lunghezza)
- $C=\epsilon/18*\ln(D_i/d_c)$ (capacità dell'isolante per unità di lunghezza)
- $R=R'(1+Y_s+Y_p)$ [Ω/m] (resistenza in corrente alternata del conduttore)
- $R'=R_0[1+\alpha_{20}(\theta-20)]$ [Ω/m] (resistenza in corrente continua)
- Y_s (fattore dell'effetto pelle)
- Y_p (fattore dell'effetto di prossimità)
- $X_s^2=8\pi f 10^{-7} K_p/R'$
- $\lambda=\lambda_1+\lambda_2$ (fattore di perdita nella guaina e nello schermo ($\lambda_2=0$ cavo non armato))
- T_1 (resistenza termica dell'isolante)
- T_2 (resistenza termica dell'imbottitura tra isolante e guaina esterna)
- T_3 (resistenza termica del rivestimento esterno del cavo)
- $T_4=1,5/3,14*\rho_T \ln(16L_3/De*s^2)$ (resistenza termica tra la superficie del cavo ed il mezzo ambiente per una terna)
- ρ_T (resistività termica del terreno)
- T_4' (resistenza termica tra superficie esterna del cavo ed il mezzo ambiente per due terne affiancate)
- T_4'' (resistenza termica tra superficie esterna del cavo ed il mezzo ambiente per tre terne affiancate)

I cavi saranno posati direttamente a contatto con il terreno. La profondità di posa è di 1,2 m e le terne che seguiranno lo stesso tracciato saranno affiancate ad una distanza, rispetto ai cavi più interni, di 0,25 m asse-asse. La portata dei cavi affiancati è calcolata tenendo conto anche del riscaldamento causato su di esso dalle correnti che effettivamente percorrono gli altri cavi posti nello stesso scavo. Tale calcolo per i vari casi previsti è fatto applicando il principio dell'immagine termica proposta dalla norma CEI 20-21.

Nelle tabelle sotto riportate sono illustrati i risultati dei calcoli di portata in base al numero di terne affiancate per le taglie di cavi che si utilizzeranno nella realizzazione della rete elettrica (95 mmq, 185 mmq, 400 mmq, 630 mmq).

È importante sottolineare che la portata dei cavi dipende fortemente dalla resistività termica del mezzo che circonda il cavo interrato. Per il calcolo delle portate di corrente è stato utilizzato un valore di resistenza termica del terreno di 1 K·m/W in STC.

È importante sottolineare che la resistenza termica dei terreni, lungo il percorso di circa 15 km dell'elettrodotto di vettoriamento cambia di molto a seconda della tipologia dei terreni che si hanno dalla zona del campo eolico fino ad arrivare alla zona della sottostazione incontrando zone influenzate dalla presenza dei diversi torrenti.



7.3 SCELTA DEL TIPO DI POSA CAVO MT

Tutti i cavi saranno interrati ad una profondità non inferiore a 1 metro (1,2 m). I cavi saranno posati su un letto di terreno vegetale oppure di terreno vagliato rinveniente dallo stesso scavo in modo tale da avere una resistenza pari a 1 K·m/W. Verranno posati anche i nastri segnalatori disposti superiormente ai cavi ad almeno 30 cm.

Gli scavi ed i ripristini sulle eventuali carreggiate stradali saranno eseguiti secondo le modalità descritte nelle tavole del progetto esecutivo civile.

Lungo gli elettrodotti saranno posati, oltre ai cavi di energia, quelli in fibra ottica per il controllo degli aerogeneratori della centrale eolica all'interno di un tritubo in PEHD, e una corda di terra in rame nudo, allo scopo di assicurare la continuità elettrica con l'impianto globale ed una efficace dispersione delle correnti di guasto. Per i cavi, in generale, si definiscono le seguenti modalità di posa:

- L: Cavi direttamente interrati senza protezione meccanica supplementare;
- M: Cavi direttamente interrati con protezione meccanica supplementare (lastra piana M.1 o apposito tegolo M.2);
- N: Cavi in tubo interrato;
- O: Cavi in condotti;
- P: Cavi in cunicolo affiorante;
- Q: Cavo in cunicolo interrato;
- R: Cavo in acqua (posato sul fondo R.1 o interrato sul fondo R.2).

7.4 SCELTA DEL LIVELLO DI TENSIONE E DEL TIPO DI CAVO

Ai sensi della norma CEI 11-17 e come riportato nella tabella 4.1.4, in funzione della tensione nominale del sistema pari a 36 kV, si ottiene:

- valore della tensione massima $U_n=36$ kV;
- categoria A oppure B cui corrisponde una durata massima per ogni singolo caso di funzionamento con fase a terra da 1 fino a 8 ore;
- tensione di isolamento a campo elettrico radiale $U_0=21$ kV.

Tra i vari cavi con materiale conduttore in alluminio, è possibile utilizzare cavi ARE4H5(AR)E - ARE4H5(AR)EX 36 kV che sono normati, per quanto riguarda le prove sui materiali, dalla norma CEI. Tutte le verifiche sono state effettuate considerando i dati elettrici e costruttivi forniti dalla committenza nonché i datasheet Prysmian.

Di seguito si riportano le caratteristiche dei vari tipi di cavo.

✓ Cavo tipo ARE4H5(AR)E - Cavo tipo ARE4H5(AR)EX

- Anima costituita da Conduttore a corda rotonda compatta di alluminio
- Strato Semiconduttivo interno costituito da miscela estrusa
- Strato Isolante costituito da Miscela di polietilene reticolato (qualità DIX 8)
- Strato Semiconduttivo esterno costituito da miscela estrusa
- Rivestimento protettivo in Nastro semiconduttore igroespandente
- Schermatura costituita da Nastro di alluminio avvolto a cilindro longitudinale ($R_{max} 3\Omega/Km$)
- Protezione meccanica con Materiale Polimerico (Air Bag)
- Guaina di Polietilene: colore rosso (qualità DMP 2)



Il cavo ha una temperatura massima di funzionamento in condizioni ordinarie di 90°C, una temperatura massima ammissibile in corto circuito di 250 °C.

Pe i tratti con cavi di sezione minore fino a 400 mmq si utilizzeranno cavi tripolari ad elica visibile tipo ARE4H5(AR)EX mentre laddove risulteranno necessari cavi di sezione maggiore (500 – 630 mmq) si utilizzeranno cavi unipolari tipo ARE4H5(AR)E

Tipo:	ARE4H5(AR)EX
Tensione nominale [kV]:	36
Formazione e sezione [mm ²]:	3x95
Resistenza a 20 °C [Ω/km]:	0.320
Resistenza a 90 °C [Ω/km]:	0.411
Reattanza [Ω/km]:	0.134
Capacità chilometrica [μF/km]:	0.193

Tabella 3 – Caratteristiche cavo 3x95

Tipo:	ARE4H5(AR)EX
Tensione nominale [kV]:	36
Formazione e sezione [mm ²]:	3x185
Resistenza a 20 °C [Ω/km]:	0.164
Resistenza a 90 °C [Ω/km]:	0.201
Reattanza [Ω/km]:	0.119
Capacità chilometrica [μF/km]:	0.252

Tabella 4 – Caratteristiche cavo 3x185

Tipo:	ARE4H5(AR)EX
Tensione nominale [kV]:	36
Formazione e sezione [mm ²]:	3x240
Resistenza a 20 °C [Ω/km]:	0.125
Resistenza a 90 °C [Ω/km]:	0.161
Reattanza [Ω/km]:	0.112
Capacità chilometrica [μF/km]:	0.294

Tabella 5 – Caratteristiche cavo 3x240

Tipo:	ARE4H5(AR)EX
Tensione nominale [kV]:	36
Formazione e sezione [mm ²]:	3x400
Resistenza a 20 °C [Ω/km]:	0.078
Resistenza a 90 °C [Ω/km]:	0.102
Reattanza [Ω/km]:	0.098
Capacità chilometrica [μF/km]:	0.344

Tabella 6 – Caratteristiche cavo 3x400

Tipo:	ARE4H5(AR)E
Tensione nominale [kV]:	36
Formazione e sezione [mm ²]:	1x500
Resistenza a 20 °C [Ω/km]:	0.0605
Resistenza a 90 °C [Ω/km]:	0.08
Reattanza [Ω/km]:	0.097
Capacità chilometrica [μF/km]:	0.321

Tabella 7 – Caratteristiche cavo 1x500



Tipo:	ARE4H5(AR)E
Tensione nominale [kV]:	36
Formazione e sezione [mm ²]:	1x630
Resistenza a 20 °C [Ω /km]:	0.0469
Resistenza a 90 °C [Ω /km]:	0.0635
Reattanza [Ω /km]:	0.094
Capacità chilometrica [μ F/km]:	0.357

Tabella 8 – Caratteristiche cavo 1x630

7.5 RISULTATI

Nelle tabelle sottostanti si riportano i dati e i risultati dei calcoli effettuati a piena potenza per tutti i cavidotti di collegamento tra le torri e del BESS e tra la CR e la RTN (cavidotto di vettoriamento):

N. Sottocampo	Tratto	Lunghezza Tratto [m]	Sezione [mmq]	Corrente di impiego da Load Flow [A]	Portata Conduttore (n° Terne affiancate) [A]	Margine di sicurezza sul carico [%]	Caduta di tensione sulla linea [%]	Verifica Caduta di tensione
Sottocampo 1	TR07-TR01	1.490	95	128,3	235,01 (1)	45,41	0,4	OK
	TR01-TR02	1.330	185	256,6	339,15 (1)	24,34	0,41	OK
	TR02-CR	2.430	500	384,9	494,57 (2)	22,17	0,56	OK
Sottocampo 2	TR04-TR05	1.370	95	128,3	235,01 (1)	45,41	0,36	OK
	TR05-TR03	1.830	240	256,6	306,23 (3)	16,21	0,45	OK
	TR03-CR	1.395	500	384,9	494,57 (2)	22,17	0,32	OK
Sottocampo 3	TR06-CR	405	95	128,3	235,01 (1)	45,41	0,11	OK

Tabella 6: Dimensionamento e verifica della portata e cdt cavidotti MT interni all'impianto eolico (potenza erogata 100%)

Sistema di accumulo	Tratto	Lunghezza Tratto [m]	Sezione [mmq]	Corrente di impiego da Load Flow [A]	Portata Conduttore (n° Terne affiancate) [A]	Margine di sicurezza sul carico [%]	Caduta di tensione sulla linea [%]	Verifica Caduta di tensione
Sistema di accumulo	BESS 3 - 2	40	95	106,92	202,11 (2)	47,1	0,01	OK
	BESS 2 - CR	40	185	213,83	291,67 (2)	26,69	0,01	OK
	BESS 1 - CR	40	95	106,92	202,11 (2)	47,1	0,01	OK

Tabella 7: Dimensionamento e verifica della portata e cdt cavidotti MT sistema di accumulo (potenza erogata 100%)

Cavidotto di vettoriamento o a 36 kV	Tratto	Lunghezza Tratto [m]	N. Terne Affiancate	Sezione [mmq]	Corrente di impiego da Load Flow [A]	Portata Conduttore (n° Terne affiancate) [A]	Margine di sicurezza sul carico [%]	Caduta di tensione e sulla linea [%]	Verifica Caduta di tensione
Cavidotto di vettoriamento o a 36 kV	CR - CV	13.440	4	400	224,53	374,41 (4)	40,03	2,12	OK
	CV - RTN	612	2	630	449,05	561,94 (2)	20,09	0,14	OK

Tabella 8: Dimensionamento e verifica della portata e cdt cavidotto di vettoriamento MT (potenza erogata 100%)



Dai risultati ottenuti, si può constatare che, in regime di funzionamento ordinario (caso di massima potenza erogata), i vincoli impostati sono verificati su ogni tratto di linea.

7.6 CONDIZIONI OPERATIVE E VINCOLI

Per i calcoli elettrici relativi ai cavidotti, si sono considerate le seguenti condizioni:

di carico:

- potenza max generatore: 7200 kW;
- Tensione nominale elettrodotto: 36 kV

di posa dei conduttori:

- tipologia di posa: direttamente interrato;
- profondità di posa: 1,00/1,2 m;
- temperatura del terreno: 25°C;
- resistività termica del terreno: 1 K·m/W;
- distanza di posa: 25 cm;
- numero totale massimo di terne nello stesso scavo: 4;
- Coefficiente di riduzione per N. 2 Terne affiancate: 0,86;
- Coefficiente di riduzione per N. 3 Terne affiancate: 0,78;
- Coefficiente di riduzione per N. 4 Terne affiancate: 0,74;

Si sono considerati i seguenti vincoli, imposti dal corretto funzionamento degli impianti e dalla scelta della soluzione più economica:

- massima caduta di tensione per collegamento tra due torri $\Delta V = 0,5\%$;
- massima caduta di tensione per collegamento tra ultima torre e stazione $\Delta V = 0,6\%$;
- tempo di intervento protezione $t=0,5$ s;
- massime perdite ammesse sulle linee: 2%;
- massimo carico previsto per il cavo: 80 %.

