



Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie,
l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Linea di Avvolgimento del Doppio Pancake della Bobina Toroidale JT-60SA

A. Cucchiaro, G.M. Polli, L. Di Pace



Report RdS/2011/375

LINEA DI AVVOLGIMENTO DEL DOPPIO PANCAKE DELLA BOBINA TOROIDALE JT-60SA

A. Cucchiaro, G.M. Polli, L. Di Pace (ENEA)

Novembre 2011

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Governo, gestione e sviluppo del sistema elettrico nazionale

Progetto: Fusione nucleare: Attività di fisica e tecnologia della fusione complementari ad ITER, denominate "Broader Approach"

Responsabile Progetto: Aldo Pizzuto, ENEA

**LINEA DI AVVOLGIMENTO DEL DOPPIO PANCAKE
DELLA BOBINA TOROIDALE JT-60 SA**

Rev.0 10 Febbraio 2011

0	10/02/2011	Gian Mario Polli	Luigi Di Pace	Antonio Cucchiaro
		Antonio Cucchiaro		
Rev.	Date	Author	Reviewer	Approver

1. Scopo della Specifica

Lo scopo di questa specifica è quello di definire i requisiti tecnici principali per la progettazione, fabbricazione, installazione, collaudo e messa in servizio di una linea di avvolgimento da utilizzare per la fabbricazione di cinquantaquattro doppi pancake a forma di "D" realizzati con cavo superconduttore.

Sei doppi pancake, una volta assemblati, costituiscono una bobina del progetto JT60

Tali bobine, montate successivamente all'interno di casse di acciaio, una volta completate e testate saranno inviate a Naka-Giappone.

2. Descrizione Tecnica

2.1 Caratteristiche dell'avvolgimento del doppio pancake.

L'avvolgimento sarà del tipo a Doppio Pancake, quindi si rende necessaria la preparazione della scorta per l'esecuzione del secondo strato nell' ipotesi che si propenda per il metodo di avvolgimento partendo dal punto intermedio.

Ogni doppio pancake è formato da 6 + 6 spire.

La forma di avvolgimento è definita da 5 centri di rotazione per altrettanti archi componenti la figura geometrica, più un tratto rettilineo.

La preparazione della scorta è realizzata con una linea dedicata composta da un aspo svolgitore porta rocchetto di trasporto, un impianto di pulizia e un aspo avvolgitore porta rocchetti di avvolgimento di primo e secondo strato.

L'avvolgimento dei doppi pancakes è realizzato con una linea di avvolgimento composta da:

- un aspo svolgitore
- una calandra a CN
- un impianto di sabbiatura
- una nastratrice
- una forma di avvolgimento

Gli impianti di svolgimento, di calandratura, sabbiatura e isolamento sono posti al di sopra della forma di avvolgimento e sorretti a sbalzo da una struttura a portale.

La struttura a portale sarà supportata da una via di corsa elevata rispetto al pavimento di officina.

Il rocchetto di avvolgimento di secondo strato è posizionato e fissato all'interno della forma durante l'avvolgimento del primo strato.

Il conduttore, proveniente dall'aspo svolgitoro, è pre-sagomato mediante calandratura e successivamente, sabbiato, isolato e avvolto nella forma D-shaped avente dimensioni di 7325 x 4365 x 57 mm.

I raggi di curvatura medi previsti sono:

- | | |
|-------------|---------|
| 1) Raggio 1 | 1220 mm |
| 2) Raggio 2 | 2400 mm |
| 3) Raggio 3 | 3880 mm |

2.2 Conduttore

Il conduttore che deve essere avvolto è un cavo superconduttore di sezione rettangolare formato da un jacket esterno di acciaio AISI 316 LN e da una treccia interna di niobio titanio.

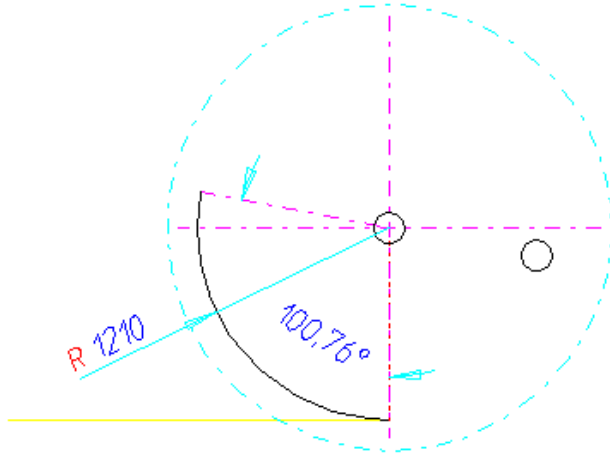
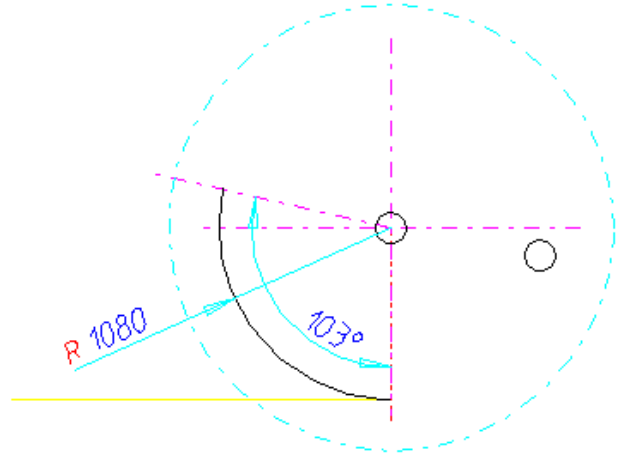
Le dimensioni del conduttore sono 26 x 22 mm.

Le dimensioni del conduttore isolato sono 28 x 24 mm.

Il conduttore sarà fornito avvolto a solenoide su rocchetti che avranno diametro interno di ~2500 mm e altezza di ~800 mm.

Il ritorno elastico del jacket dopo piegatura deve essere tenuto sotto controllo.

Adottando una opportuna riduzione del raggio di curvatura e la relativa compensazione ottenuta incrementando l'angolo di piegatura dovrebbe essere riconducibile allo schema:

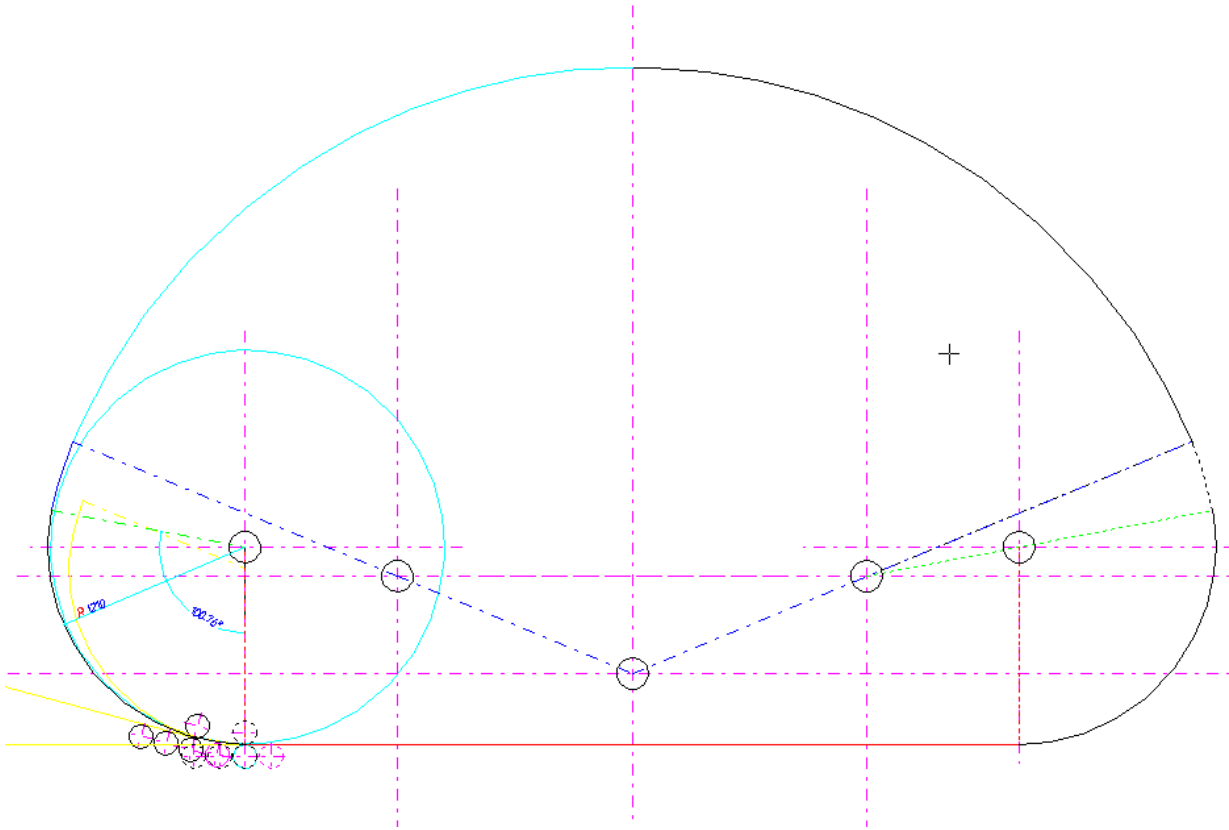
*quote nominali**quote di lavorazione*

Da questa situazione ne consegue la modifica dei parametri di curvatura rispetto ai valori nominali e ne deriva la necessità di disporre la forma d'avvolgimento o il conduttore, in modo flessibile rispetto allo sviluppo delle geometrie di piegatura.

Il conduttore sarà sagomato in aria, sopra la forma ed in seguito calato e fissato sulla forma stessa con staffe.

In questo modo, sarà possibile ridurre i raggi di calandratura e allo stesso tempo incrementare l'angolo di curvatura mantenendo così la corretta posizione finale del conduttore sulla forma di avvolgimento.

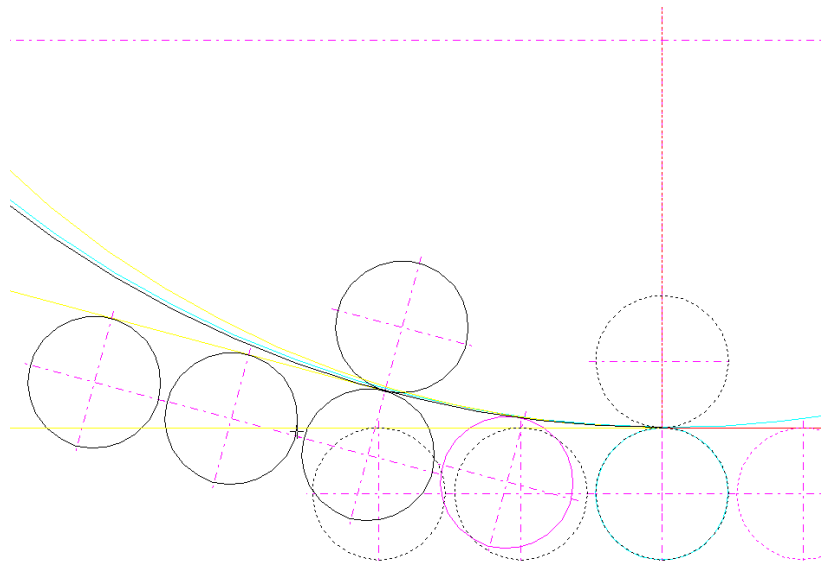
2.3 Lunghezza di transizione tra un raggio di curvatura e il successivo:



A titolo di esempio vengono riportate nel seguito le considerazioni necessarie per la sagomatura corretta del conduttore che tiene conto del ritorno elastico dello stesso.

Durante l'operazione di avvolgimento del cavo si presentano le seguenti situazioni:

- La spirale nominale è riferita alla linea nera mentre la regolazione di calandratura è rappresentata dalla linea gialla



In questa fase si ipotizza che:

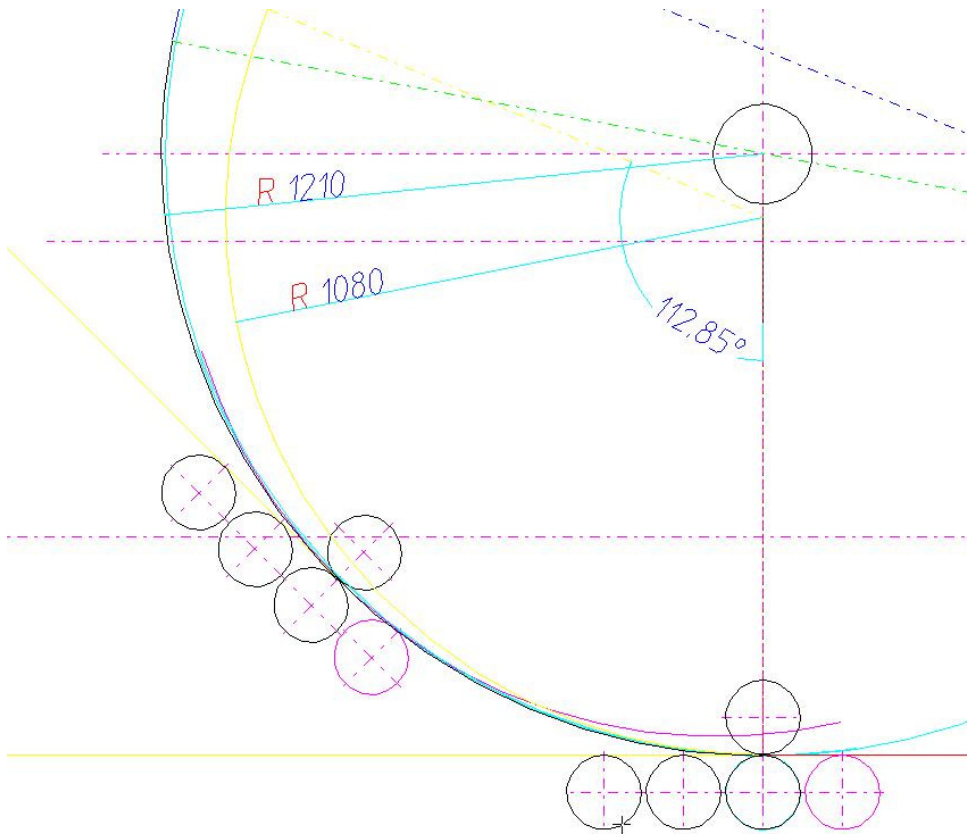
- la calandra lavora sul raggio della linea gialla
- il conduttore in uscita dalla calandra si dispone sul raggio della riga color ciano, che è sostanzialmente sovrapponibile al percorso nominale, ma non si trova perfettamente sullo stesso percorso

Per compensare questo disallineamento è necessario rendere la calandra flottante.

Nei tratti di transizione (da rettilineo a curvo o viceversa, variazione del raggio di curvatura) il percorso corretto del conduttore verrà stabilito dopo una adeguata attività di qualifica in quanto le caratteristiche elasto-plastiche del jacket in acciaio 316L dopo il processo di compattazione del conduttore sono verificabili solo con l'evidenza sperimentale (non è trascurabile sulla base di esperienze precedenti il comportamento del superconduttore sia come materiale base che come passo di cablatura e frazione di vuoto all'interno del jacket).

Allo stato attuale si prevede in ogni caso che la zona di transizione (tra raggi diversi e tra conduttore rettilineo e zona curva) non sarà localizzata in una sezione singola del conduttore.

E' da precisare che il tratto a valle della calandra dovrà essere di lunghezza adeguata, libero da contenimenti, in modo che il conduttore possa adattarsi agli scostamenti della calandra.



Nell' immagine precedente con la calandra inclinata 45° si ipotizza la seguente situazione:

raggio di calandratura regolato sulla curva gialla: il conduttore dovrebbe presentare un raggio come la curva viola ma a causa del ritorno elastico il conduttore si disporrà come la curva ciano.

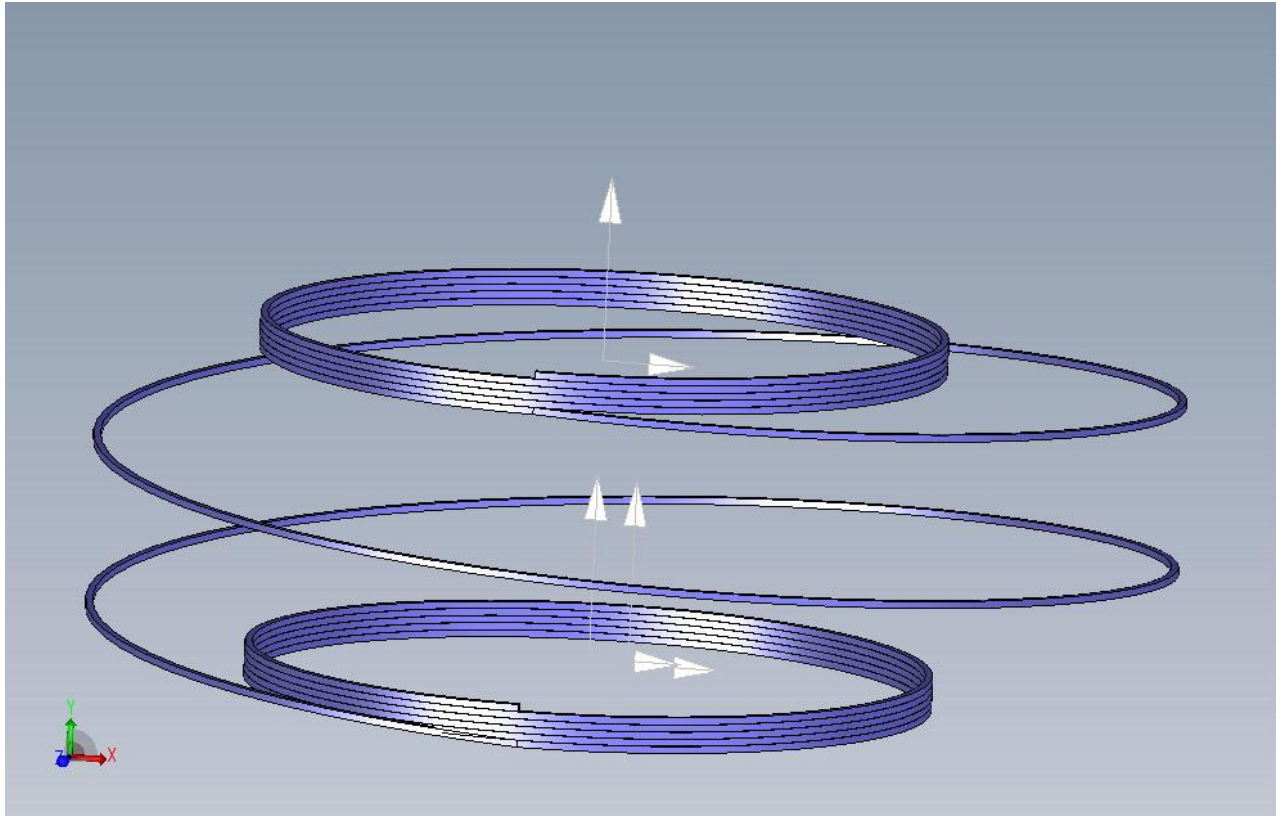
3. Preparazione scorta:

La preparazione della scorta può essere realizzata con la linea d'avvolgimento dei doppi pancake o con una linea dedicata.

Il conduttore deve essere avvolto nei due rocchetti d'avvolgimento su un unico strato.

Le estremità della pezzatura sono bloccate alle estremità superiori dei due rocchetti mentre il salto di strato è posizionato e bloccato nella zona mediana in corrispondenza dell'unione dei due rocchetti.

Le spire del primo strato sono avvolte dall'alto verso il basso mentre quelle del secondo strato sono avvolte dal basso verso l'alto.



3.1 Linea di avvolgimento

Il metodo costruttivo prevede una sequenza operazioni che può essere riassunta secondo le seguenti fasi principali:

- a) svolgimento del conduttore dal rocchetto
- b) raddrizzatura del conduttore
- c) sgrassaggio, lavaggio ed asciugatura del conduttore
- d) calandratura del conduttore
- e) sabbiatura del conduttore
- f) nastratura del conduttore
- g) esecuzione di circa una spira
- h) trasferimento del tratto di spira realizzato, mediante discesa progressiva, sulla forma di avvolgimento
- i) calandratura e trasferimento di altro conduttore sulla forma di avvolgimento
- j) pressatura radiale progressiva del conduttore trasferito, rispetto ad un riferimento esterno, per garantire la forma e la compattazione delle spire
- k) completamento primo strato, compattazione finale e montaggio riferimento interno

- l) realizzazione salto di strato
- m) calandratura e trasferimento di altro conduttore sulla forma di avvolgimento
- n) pressatura radiale progressiva del conduttore trasferito, rispetto al riferimento interno, per garantire la forma e la compattazione delle spire
- o) completamento secondo strato e compattazione finale
- p) sagomatura uscite

La tecnica di avvolgimento che dovrà essere realizzata richiede la fornitura di componenti base che assemblati tra loro formeranno la linea in oggetto:

- 1) aspo svolgitore
- 2) raddrizzatrice del conduttore
- 3) impianto di pulizia del conduttore
- 4) unità di calandratura del conduttore
- 5) impianto di sabbiatura del conduttore calandrato
- 6) nastratrice del conduttore calandrato
- 7) forma di avvolgimento comprensiva di riferimenti esterni ed interni e di staffe di compattazione per le spire
- 8) tavola roto-traslante per sostegno e rotazione della forma di avvolgimento sincronizzata con l'avanzamento del conduttore calandrato

Gli altri impianti (calandra, sabbiatrice e nastratrice) dovranno essere posti al di sopra della tavola roto-traslante, sulla quale è fissata la forma di avvolgimento, per consentire la discesa di trasferimento delle spire calandrate nella posizione di avvolgimento all'interno della forma stessa.

L'altezza di trasferimento delle spire calandrate, ovvero la distanza tra la *pass-line* (asse del conduttore in arrivo e in calandratura) e il piano di deposito delle spire deve essere inferiore a 500 mm, ciò è necessario per facilitare al massimo il loro posizionamento e la loro compattazione senza avere deformazioni o twistature.

La velocità della linea o di avanzamento del conduttore sarà compresa tra 0.25 e 1.5 m/min.

L'area scelta per l'installazione della linea di avvolgimento sarà una zona separata dal resto dell'officina, per garantire i requisiti minimi di pulizia che un avvolgimento di questo tipo richiede. Tale area sarà servita da un carroponete la cui portata comunque non sarà inferiore a 20.000 kg.

3.2 Aspo svolgitore

L'aspo svolgitore sarà un'unità motorizzata, ad asse di rotazione verticale, in grado di movimentare un rocchetto recante una pezzatura di conduttore lunga ca. 230 m e del peso approssimativamente di 1000 kg (circa 3.5 kg/m). I particolari del rocchetto devono essere ancora definiti, comunque il conduttore sarà avvolto su di esso, a solenoide, su un diametro interno di circa 2500 mm per un'altezza di 800 mm.

La struttura portante, in acciaio elettrosaldato, dovrà essere dotata di un sistema di centraggio e bloccaggio del rocchetto, tale da rendere le operazioni di montaggio semplici e sicure. Dovrà anche essere dotato di un rullo regolabile, con molle di pressione, per il contenimento delle spire sul rocchetto durante lo svolgimento. In nessun caso il conduttore deve svolgersi in modo non controllato.

La rotazione dell'aspo dovrà essere sincronizzata con la velocità di avvolgimento della linea mediante controllo di posizione. Tale velocità sarà anche funzione delle caratteristiche tecniche dei vari componenti della linea, tuttavia il valore sarà compreso tra 0.25 e 1.5 m/min.

La velocità di rotazione sarà compresa tra 0.05 ÷ 0.5 giri/min.

L'aspo dovrà consentire la rotazione del rocchetto in entrambe le direzioni.

In un caso (avvolgimento doppio-pancake orario) lo svolgimento inizierà dalla prima spira posta in alto e la posizione del conduttore dovrà essere garantita sulla *pass-line* durante tutto lo svolgimento. Poiché il conduttore è avvolto a solenoide sul rocchetto, l'aspo dovrà avere un dispositivo di salita, movimento verticale, con motorizzazione in c.a., che esegua una traslazione verticale di 26 mm al giro in modo da mantenere allineata la posizione del conduttore rispetto alla linea di avvolgimento.

Nell'altro caso (avvolgimento doppio-pancake antiorario) lo svolgimento inizierà dalla prima spira posta in basso e l'aspo dovrà compiere una traslazione verticale verso il basso di 26 mm per garantire la posizione del conduttore sulla *pass-line*. In questo caso però sarà anche necessario avere un dispositivo esterno che sostenga le spire ancora avvolte sul rocchetto per evitare che possano cadere lungo il rocchetto perdendo così l'allineamento di svolgimento.

L'unità sarà comandata da un quadro elettrico predisposto per il funzionamento indipendente o in linea, che sarà collegato all'impianto *master* della linea secondo la logica di gestione prevista dal progetto

3.3 Gruppo di guida del conduttore in svolgimento

Questa unità, posta davanti all'aspo svolgitoro, ha il compito di guidare il conduttore, piegato sul raggio del rocchetto, facilitandone l'introduzione nell'unità di raddrizzatura. Tale unità, concepita come una doppia coppia di rulli contrapposti folli, tenderà a raddrizzare il cavo, su onda lunga, ma non dovrà generare onde corte di deformazione meccanica o, comunque, deformazioni di tipo permanente e non dovrà ostacolare, bensì facilitare, il regolare svolgimento della linea. Tale gruppo dovrà essere regolabile, in particolare la distanza tra i rulli deve poter avere un'ampia corsa per potersi adattare alle caratteristiche comportamentali del cavo.

	LINEA DI AVVOLGIMENTO DEL DOPPIO PANCAKE DELLA BOBINA TOROIDALE JT-60 SA	RT-JT60SA-004	Rev. 0
		Pag 10 di 22	

3.4 Raddrizzatrice

Quest' impianto, posto vicino all'aspo svolgitoro, ha il compito di raddrizzare completamente il conduttore, nelle due direzioni, in modo da ottenere una buona rettilineità necessaria per la fase di avvolgimento (tratti dritti). Si richiede pertanto che il cavo abbia un errore di rettilineità non superiore a 0,2 mm/m. La raddrizzatrice in oggetto avrà una serie di rulli disposti su entrambe le direzioni, sincronizzati con la velocità di funzionamento della linea.

L'unità sarà dotata di un quadro elettrico per il funzionamento manuale o in linea, che sarà collegato all'impianto *master* della linea secondo la logica di gestione prevista dal progetto.

3.5 Impianto di pulizia

Il conduttore, dopo essere stato raddrizzato, dovrà essere sottoposto ad un'operazione di pulizia per rimuovere l'eventuale presenza di polvere di o di altre impurità che potrebbero essere presenti sulla sua superficie. A tal fine è previsto, in linea, un impianto di pulizia ad ultrasuoni che sgrassa, lava, risciacqua ed asciuga il conduttore. L'unità in oggetto è una struttura compatta avente dimensioni 3000 x 700 x 1300 mm (l x p x h) dotata di quadro elettrico per il funzionamento in manuale ed in linea.

3.6 Unità di calandratura

Una volta raddrizzato e pulito il conduttore deve essere calandrato per creare le spire che compongono i due strati del doppio pancake. Ogni spira è caratterizzata da un tratto dritto e da tratti curvi in successione aventi diametri e sviluppi differenti. Al variare delle spire variano conseguentemente gli sviluppi e i raggi di curvatura, incrementandosi della dimensione del cavo isolato

Secondo la tecnica di avvolgimento, il primo strato da realizzare (inferiore) partirà dall'esterno, quindi dalla sesta spira (la più lunga e sagomata sui raggi massimi) proseguendo su sviluppi e raggi sempre minori. Al contrario il secondo strato (superiore) partirà dalla prima spira (la più corta e sagomata su raggi minimi) proseguendo su sviluppi e raggi sempre maggiori. Di questo andamento dovrà tenere conto il programma di avanzamento e sagomatura del conduttore, che dovrà realizzare il doppio pancake in modo continuo dall'azzeramento di partenza fino alla fine.

Durante l'avvolgimento la linea potrà e dovrà essere fermata ogniqualvolta l'operatore lo richieda, in particolare:

- per controllare, mediante opportune dime, il raggio di calandratura realizzato
- per eseguire, se necessario, operazioni di messa a punto della sabbiatura
- per controllare la rugosità del conduttore

- per cambiare i rocchetti del nastro di isolamento
- per depositare le spire calandrate ed eseguire le operazioni di compattazione
- per eseguire, se necessario, delle correzioni locali
- per eseguire rilievi dimensionali
- per realizzare il salto di strato

In tutti questi casi il programma di gestione della linea deve sempre tenere in memoria il lavoro già eseguito ed il passo di programma in esecuzione che è stato momentaneamente interrotto, pronto a riprendere senza che nulla possa modificare i parametri di lavoro e senza che nulla sia variato, in modo particolare la posizione del o dei rulli calandratore. In ogni momento, sia in fase di lavoro che in fase di riposo, l'operatore deve poter monitorare alcuni parametri che gli consentono di eseguire quei controlli di processo necessari a verificare il buon andamento dell'avvolgimento, in particolare:

- controllare il numero di spire eseguite
- controllare la quantità di conduttore lavorato
- verificare lo sviluppo corretto di ogni singola spira
- trapiantare la corretta sovrapposizione delle spire

Il quantitativo di conduttore utilizzato in linea dovrà essere misurato da un encoder il cui segnale sarà opportunamente visualizzato su un display posto sul quadro di comando.

Per realizzare i tratti curvi il conduttore deve quindi essere piegato in modo completamente plastico così da garantire il mantenimento della curvatura ottenuta e consentire il posizionamento corretto nella forma di avvolgimento.

La calandratura determinerà una deformazione della sezione rettangolare trasversale del conduttore ottenendo una tipica forma trapezoidale (effetto keystone) che incrementa sul lato interno la dimensione dello spessore del cavo. E' necessario che questa variazione dimensionale sia contenuta in ± 0.1 mm. A tal fine il fornitore dovrà sviluppare la geometria del o dei rulli calandratore in modo tale da contenere questo effetto ed eseguire in fase di costruzione dei test di qualifica.

Un altro problema riscontrato durante la fabbricazione di spire mediante calandratura sempre su cavi superconduttori è una leggera inclinazione (twistatura) della sezione calandrata rispetto al piano di riferimento. Tale inclinazione, se non contenuta, comporta problemi dimensionali dello strato realizzato.

La tolleranza di planarità che si ritiene di poter accettare è di 0.1 mm/m.

Il conduttore, in entrata ed in uscita dall'unità di calandratura, deve essere ben guidato per mezzo di rulli, per evitare che la presenza di onde lunghe di deformazione possa creare attriti sui rulli ed avere come conseguenza un'asportazione di materiale sulla superficie del cavo. Questi rulli di contenimento dovranno essere motorizzati, integrati con la calandra, e costituire un *alimentatore* per il conduttore e per tutta la linea.

La struttura portante dell'unità di calandratura dovrà essere tale da consentire il posizionamento dei rulli, sia di avanzamento che di piegatura, sulla verticale della spira che si deve realizzare e dovrà essere regolabile per adattarsi alla posizione radiale delle sei spire. I rulli di avanzamento/contenimento del conduttore, così come i rulli di piegatura, dovranno essere trattati superficialmente in modo da ridurre l'attrito con il cavo e di conseguenza eliminare o limitare al massimo i danni superficiali. In nessun caso sono ammessi lubrificanti per migliorare lo scorrimento del conduttore, poiché sono inquinanti per l'avvolgimento.

Il sistema di movimentazione per portare in posizione il rullo di piegatura dovrà essere tale da consentire:

- variazioni decimali dello spostamento del rullo
- possibilità di modificare la posizione durante la calandratura
- visualizzazione della quota raggiunta
- mantenimento sotto sforzo della quota impostata

Le quote trovate ed inserite a programma devono sempre essere visualizzabili per permettere le verifiche di ripetibilità e per valutare eventuali fattori correttivi.

Il sistema di calandratura dovrà essere realizzato come un singolo impianto, dotato di un'unica motorizzazione per eliminare problemi di sincronizzazione. Dal punto di vista della gestione della linea, il sistema di calandratura dovrà essere considerato come l'unità *master* che gestisce il processo. Lo *start* della calandra dovrà rappresentare quindi lo *start* per tutti i componenti della linea che si attiveranno per entrare in funzione in modo sincronizzato e dovranno dialogare con il *master* attraverso un protocollo di interfaccia, oggetto della progettazione di gestione della linea.

Il quadro elettrico di comando dell'unità di calandratura dovrà consentire il funzionamento manuale ed in linea dell'impianto e sarà equipaggiato con un CN per la gestione assi della linea nonché con un PLC per la gestione IN/OUT della linea.

Tutti i comandi per il funzionamento della linea dovranno essere conglobati in un unico quadro di comando dal quale gli operatori possono azionare la linea e tenere sotto controllo gli impianti.

In particolare, l'operatore dovrà avere la possibilità di azionare i comandi della linea, permettendogli al tempo stesso di controllare i parametri fondamentali del processo e tenere sotto controllo il conduttore in lavorazione.

I comandi di funzionamento dovranno essere anche remotati su un radiocomando per consentire agli operatori di azionare la linea indipendentemente dalla loro posizione di lavoro.

