

ESPERIENZE DI RICERCA IN UN PROGETTO CONGIUNTO “UNIVERSITA’-IMPRESA” PER L’AUTOMAZIONE DELLE RETI ELETTRICHE DI DISTRIBUZIONE E IL TRASFERIMENTO INTERNAZIONALE DI KNOW HOW.

V. Cecconi, M.G. Ippolito, R. Miceli, G. Ricco Galluzzo, M. Trapanese

Dipartimento di Ingegneria Elettrica, Università degli Studi di Palermo

SOMMARIO

La memoria presenta i principali contenuti di un progetto di ricerca cofinanziato nell’ambito di un accordo quadro siglato tra MAP (Ministero per le Attività Produttive), ICE (Istituto per il Commercio Estero) e CRUI (Conferenza dei Rettori delle Università Italiane). Il progetto, coordinato dall’Università degli Studi di Palermo e sviluppato con l’Università degli Studi Catania, presenta un quadro di partnership estremamente ampio e variegato, sia in ambito nazionale (Università, CEI, IMQ, soggetti imprenditoriali del settore elettrico operanti in Sicilia) che internazionale (Università, aziende e utilities di diversi Paesi). Nel lavoro, oltre ai contenuti generali e agli obiettivi del progetto, vengono indicate le specifiche azioni intraprese da tutti i soggetti coinvolti e descrive, in sintesi, le basi scientifiche e le esperienze di ricerca maturate presso l’Università di Palermo nel settore dell’automazione dei sistemi elettrici di distribuzione e della generazione distribuita di energia elettrica.

INTRODUZIONE

La promozione dell’internazionalizzazione della produzione industriale e il trasferimento di know how richiedono lo sviluppo di processi e prodotti innovativi, con riferimento sia a manufatti e specifici componenti sia alle logiche di gestione dei sistemi che li contengono, comprendendo le fasi di ricerca scientifica e tecnologica, di ingegnerizzazione, di realizzazione e di commercializzazione.

In tale contesto si inquadra il progetto titolato “*Ottimizzazione e automazione di cabine elettriche di distribuzione e di sistemi di produzione locale dell’energia elettrica a sostegno dell’innovazione della produzione di aziende elettromeccaniche siciliane per la penetrazione in mercati esteri*”, cofinanziato nell’ambito dell’accordo quadro siglato tra MAP (Ministero per le Attività Produttive), ICE (Istituto per il Commercio Estero) e CRUI (Conferenza dei Rettori delle Università Italiane), in base ai contenuti della Circolare MAP n° 511049 del 27.10.2003, coordinato dall’Università degli Studi di Palermo e sviluppato con l’Università degli Studi di Catania, con il coinvolgimento di:

- alcuni soggetti imprenditoriali siciliani operanti nel settore dell’industria elettrica;
- Università ed Utilities di diversi paesi stranieri (Albania, Brasile, Cina, Libia, Serbia e Tunisia);
- CEI (Comitato Elettrotecnico Italiano) e IMQ (Istituto Italiano del Marchio di Qualità).

In particolare il settore di intervento del progetto riguarda lo sviluppo della collaborazione all’estero nel campo della ricerca applicata, della innovazione e del trasferimento tecnologico nonché della formazione e diffusione delle conoscenze per quanto riguarda gli impianti e le apparecchiature di cabine elettriche di distribuzione e sistemi di produzione locale dell’energia elettrica insieme alla loro ottimizzazione e gestione automatizzata.

Gli obiettivi precisi del progetto sono:

- lo sviluppo di componenti e prodotti dell’industria elettrica nazionale, già di interesse per paesi esteri, per

interventi di prima elettrificazione o per il potenziamento e la riqualificazione delle reti elettriche di distribuzione attualmente in servizio in tali Paesi;

- il rafforzamento dei rapporti tecnici, commerciali e di collaborazione scientifica con i partner stranieri per favorire il trasferimento di know how, incentivare lo sviluppo della cultura scientifica e tecnologica e contribuire ad accrescere in tali Paesi le competenze del tessuto imprenditoriale per la realizzazione di prodotti tecnologicamente avanzati;

- la diffusione della cultura conoscitiva e applicativa della normativa tecnica internazionale dell’IEC (International Electrotechnical Commission), europea del CENELEC (Comité Européen de Normalization Electrotechnique) e nazionale del CEI nei paesi partecipanti.

Nel quadro degli indirizzi generali sopra delineati, di seguito, dopo una breve presentazione dei promotori e dei partner del progetto, vengono descritte le specifiche azioni di ricerca intraprese e le esperienze di ricerca maturate nel settore d’intervento.

PROMOTORI E PARTNER DEL PROGETTO

Promotori del progetto

I promotori del progetto sono:

- l’Università degli Studi di Palermo (con compiti di coordinamento) e l’Università degli Studi di Catania.

In particolare al progetto partecipano ricercatori afferenti ai settori scientifico-disciplinari Ing-Ind/32 “Convertitori Macchine e Azionamenti Elettrici” e Ing-Ind/33 “Sistemi Elettrici per l’Energia” che hanno, tra l’altro, maturato una specifica esperienza nel settore dell’automazione delle reti elettriche di distribuzione e della gestione automatizzata dei sistemi di Generazione Distribuita di energia elettrica.

- alcuni soggetti imprenditoriali siciliani:
 - l’Ausionia s.r.l., media impresa con sede a Marsala, che opera nel settore della progettazione e costruzione di macchine

ed impianti per la produzione e conversione dell'energia elettrica;

- la *C.E.P. (Componenti Elettrici e Prefabbricati) s.r.l.*, azienda con sede ad Alcamo (TP) che produce e commercializza componenti e apparecchiature elettriche per media e bassa tensione e cabine elettriche di distribuzione prefabbricate;

- la *CO.E.M. (Costruzioni Elettro Meccaniche) S.p.A.*, società costruttrice di quadri e di apparecchiature elettriche di media tensione e di cabine elettriche prefabbricate di trasformazione MT/BT completa-mente attrezzate in fabbrica, che è impegnata nella fornitura, ormai consolidata, dei suoi prodotti in Italia e all'estero;

- la *ELMEC S.p.A. – Elettromeccanica costruzioni e ricerca S.p.A.* con sede a Belpasso (CT), che è una ditta costruttrice di componenti elettrici quali interruttori e interruttori di manovra sezionatori per media tensione, quadri per bassa tensione di protezione e controllo per sottostazioni e centrali elettriche, quadri in media tensione protetti per cabine primarie, box in lamiera per alimentazioni di emergenza di cabine elettriche e per impianti di rifasamento delle reti in media tensione.

Partner

Il progetto si avvale di altri partner italiani e di partner stranieri.

- *altri partner italiani*
 - CEI (Comitato Elettrotecnico Italiano)
 - IMQ (Istituto Italiano del Marchio di Qualità)
- *partner stranieri*
 - l'Università Politecnica di Tirana (Albania)
 - la Scuola Politecnica dell'Università di San Paolo (Brasile)
 - Università di Tunisi (Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunisi) ENIT (Tunisia);
 - Università di Tripoli (Libia)
 - Ente di distribuzione dell'energia elettrica albanese KESH – Tirana (Albania)
 - EDC Equipamentos e Sistemas - Curitiba (Brasile)
 - C.E.E.I. (Compagnie d'Electricité e d'Electronique Industrielle) – Tunisi (Tunisia)
 - MGE (Merlin Gerin Electronique) Ltd -UPS (Uninterruptible Power Supply) SYSTEMS - Shanghai (Cina)
 - Electro Start - Belgrado (Serbia).

Le aziende coinvolte sono state individuate in relazione ai seguenti fattori:

- omogeneità delle produzioni, seppure differenziate;
- affinità delle produzioni con le competenze dei gruppi di ricercatori delle Università di Palermo e di Catania;
- collegamenti economici e tecnici con Paesi di aree contemplate nella circolare/bando MAP/ICE;
- interesse a migliorare la propria produzione per una maggiore penetrabilità nei Paesi esteri presi in considerazione;
- compatibilità alla coesistenza degli stessi soggetti aziendali nel medesimo progetto.

I Paesi esteri coinvolti nel progetto sono stati prescelti sulla base dei seguenti elementi:

- conoscenza da parte dei ricercatori delle Università di Palermo e di Catania della realtà economica e tecnica di settore in detti Paesi esteri, avendo operato direttamente in collegamento con le Università locali (Brasile, Tunisia) o per collegamenti indiretti (Albania, Libia, Cina, Serbia);
- riscontro tangibile della possibilità, auspicata dagli ambienti interessati dei Paesi esteri, di accrescere le loro conoscenze e capacità "a saper fare" seguendo le attività di ricerca che saranno sviluppate e applicandone i risultati, anche

attraverso l'utilizzazione dei prodotti italiani in tal modo migliorati e innovati;

- previsione certa di crescita della cultura accademica delle rispettive Università straniere e di quelle italiane coinvolte grazie alla collaborazione scientifica e tecnologica che si svilupperà;

- creazione di punti di riferimento permanenti di consultazione culturale e tecnica nelle Università di detti Paesi, utile alle aziende locali;

- interesse al miglioramento delle condizioni di affidabilità e sicurezza degli impianti di distribuzione dell'energia elettrica in detti Paesi:

- prospettiva dell'industria locale di acquisire conoscenze e capacità di utilizzo degli avanzamenti tecnologici conseguiti dall'industria italiana per migliorare, successivamente, le proprie capacità produttive;

- collaborazione maturata (in Brasile e Tunisia) grazie a soggiorni di lavoro scientifico nelle Università estere e a permanenze di medio termine di stagisti stranieri nelle Università siciliane e viceversa, con il risultato di aver prodotto pubblicazioni scientifiche congiunte presentate in congressi internazionali.

AZIONI DI RICERCA E SVILUPPO TECNOLOGICO PREVISTE IN AMBITO NAZIONALE

Le azioni dei singoli soggetti coinvolti nel progetto sono qui di seguito descritte.

Azioni delle Università degli Studi di Palermo e di Catania

Le Università di Palermo e di Catania, con una consolidata esperienza di collaborazione scientifica in progetti di ricerca di prevalente interesse nazionale finanziati dal MURST (oggi MIUR) che ha portato a numerose pubblicazioni scientifiche congiunte e alla realizzazione di prototipi, intendono sviluppare una progettualità comune tra Università, Imprese e altri Soggetti interessati, nazionali ed esteri.

Per una migliore penetrazione nei mercati esteri delle imprese siciliane coinvolte nel progetto di ricerca, le Università di Palermo e di Catania svilupperanno la loro attività di ricerca scientifica a sostegno di quei prodotti che le imprese hanno individuato come i più interessanti per accrescere la loro presenza e competitività in ambito internazionale.

Più in particolare i ricercatori svilupperanno le loro azioni di ricerca nel campo dell'ottimizzazione dei componenti presenti nelle cabine elettriche di distribuzione dell'energia elettrica prodotte dai partner imprenditoriali del progetto, con riguardo soprattutto ai componenti di protezione (quali gli interruttori) e controllo, con valori di tensione anche difforni da quelli utilizzati nel mercato italiano ma richiesti all'estero. Inoltre, svolgeranno attività di ricerca nel campo dell'automatizzazione di cabine elettriche di distribuzione per l'implementazione di adeguati sistemi di diagnosi e controllo dei sistemi elettrici. Grazie all'automatizzazione spinta che si intende introdurre, si intende rendere più competitivi, dal punto di vista del mercato estero, tali sistemi, migliorandone le caratteristiche tecniche e incrementandone le prestazioni, soprattutto in termini di continuità del servizio.

Le Università di Palermo e di Catania intendono svolgere anche attività di ricerca nel campo dell'automatizzazione spinta di sistemi per la generazione distribuita di energia elettrica, ivi compresi i gruppi elettrogeni, sviluppando un sistema di telegestione per il controllo automatico di tutti i

parametri fondamentali di funzionamento delle unità di generazione, tenendo in conto le problematiche di impatto sugli impianti di distribuzione e di integrazione con i sistemi automatizzati delle cabine elettriche di distribuzione. Con queste azioni il progetto intende sostenere i soggetti imprenditoriali nello sviluppo di prodotti tecnologicamente all'avanguardia che soddisfino le sempre più esigenti richieste di mercato, in termini di qualità dei servizi e dei prodotti.

Azioni previste dalle Imprese coinvolte nel Progetto

Le azioni delle Imprese coinvolte nel Progetto sono di seguito riassunte:

Una prima azione riguarda lo sviluppo e l'implementazione di un applicativo multidimensionale, residente su un portale internet, funzionale al raggiungimento dei seguenti obiettivi:

- utilizzare la rete informatica come vero e proprio canale di vendita in modo da supportare, in maniera interattiva, la forza vendita ed i clienti nelle scelte tecnico/economiche;
- assicurare, mediante la telegestione, una tempestiva analisi degli allarmi, al fine di minimizzare i costi legati al disservizio per il fermo impianto;
- fornire il know-how necessario ai centri assistenza, per una corretta gestione e diagnostica degli eventi, con la creazione di una database tecnico on-line;
- raccogliere i dati relativi agli interventi di manutenzione correttiva per attuare un continuo miglioramento del livello di servizio offerto, mediante analisi eseguite su basi statistiche;
- centralizzare la gestione logistica degli impianti, delle attrezzature e delle risorse umane al fine di ottimizzarne l'utilizzo.

L'azienda che intende portare avanti questa azione è interessata anche al miglioramento tecnologico ed alla distribuzione, nei mercati esteri destinatari del progetto, di gruppi elettrogeni di taglia compresa fra 3 e 3000 kVA.

Una seconda azione riguarda la commercializzazione all'estero delle cabine elettriche di distribuzione prefabbricate, prodotte da una delle aziende coinvolte nel progetto, adeguatamente adattate ai mercati esteri, in particolare in Paesi quali la Libia, dove più forte può rivelarsi il grado di penetrabilità commerciale sia per la presenza di un mercato scarsamente concorrenziale sia per la vicinanza geografica. Naturalmente ciò è subordinato all'adeguamento del prodotto alle prescrizioni tecniche del Paese d'esportazione. L'azienda interessata mira pertanto ad una ricerca preliminare, da sviluppare d'intesa con i partner universitari, tesa ad individuare se esistono e quali siano le prescrizioni normative, le eventuali documentazioni di unificazione imposte dagli enti di distribuzione di energia elettrica e le procedure di omologazione per la commercializzazione del prodotto, vigenti in Libia e riguardanti le cabine elettriche di distribuzione. Questa ricerca preliminare determinerebbe, da parte dei partner italiani del progetto quali il CEI e l'IMQ, nel caso di *vacatio legis*, la possibilità di dare corso ad azioni di surrogazione della normativa inesistente con le Norme Tecniche del CEI e con le procedure di valutazione di qualità e di conformità proprie dell'IMQ. La attività di promozione all'estero delle Province Regionali di Palermo e Catania e l'intervento della Accademia Libica in Italia consentirebbero, infine, all'azienda di verificare la possibilità reale di penetrazione diretta nel mercato libico o quella di un trasferimento tecnologico a società già presenti in quel mercato ed interessate al proprio prodotto.

Una terza azione ha come obiettivo tecnico la realizzazione di un interruttore per media tensione con valori

di tensione nominale difformi da quelli attualmente adottati nel sistema elettrico italiano, ma conformi a quelli dell'area di espansione commerciale prevista. Il componente da sviluppare deve essere caratterizzato da una maggiore compattezza rispetto agli interruttori tradizionali per le stesse tensioni, pur preservando i necessari spazi della camera di estinzione dell'arco elettrico. Scopo dell'azienda che intende portare avanti tale azione nell'ambito del progetto è il completamento e l'ingegnerizzazione di un prototipo in fase di definizione di interruttore sezionatore da 24 kV a 36 kV, in modo da ottenere un nuovo prodotto ad alto contenuto tecnologico. L'accresciuto miglioramento tecnologico qualitativo del prodotto è programmato per una maggiore penetrazione commerciale in ambito nazionale ed internazionale, in particolare nei mercati del Brasile con il quale sussiste già un rapporto di partnership commerciale, di installazione dei prodotti ed assistenza tecnica.

TRASFERIMENTI INTERNAZIONALI DI KNOW HOW

Per quanto riguarda l'azione di formazione e di diffusione delle conoscenze, le Università di Palermo e di Catania sosterranno l'impegno del CEI (Comitato Elettrotecnico Italiano) e dell'IMQ (Istituto Italiano del Marchio di Qualità) nel diffondere all'estero, assieme ai soggetti universitari locali, la cultura conoscitiva e applicativa della Normativa Tecnica del settore elettrico così come della verifica della conformità ad essa e la cultura del rispetto della normativa tecnica di sicurezza dei prodotti così come della qualità dei sistemi produttivi, particolarmente nei Paesi in via di sviluppo che si affacciano sul mare Adriatico e sul mare Mediterraneo e in quelli dell'America latina coinvolti nel progetto stesso. Particolare riguardo sarà posto ai sistemi di valutazione della conformità a Norme Tecniche di impianti e di apparecchiature elettriche di cabine di distribuzione e di sistemi per la generazione distribuita di energia elettrica.

Il CEI, al punto 6 del Piano Esecutivo del proprio Piano Strategico, prevede la diffusione della cultura conoscitiva e applicativa della Normativa Tecnica del settore elettrico nei Paesi in via di sviluppo. Più precisamente il CEI ha in programma di poter svolgere in detti Paesi azioni formative e di diffusione delle conoscenze sui valori e sui contenuti della Normativa Tecnica internazionale dell'IEC (International Electrotechnical Commission), europea del CENELEC (Comité Européen de Normalization Electrotechnique) e nazionale italiana del CEI, quali elementi di garanzia delle produzioni industriali qualificate e della difesa dei consumatori.

Per lo sviluppo di questa azione il CEI si avvarrà dell'esperienza già maturata nello svolgimento delle attività portate avanti nell'ambito del Progetto "Area Mediterranea", finanziato dalla Commissione Europea e teso alla promozione della conoscenza delle attività di normazione internazionale (IEC) e europea (CENELEC).

L'IMQ, nell'ambito del suo tradizionale impegno a diffondere la cultura del rispetto della Normativa Tecnica di sicurezza dei prodotti e della qualità dei sistemi produttivi da comprovare con certificazioni di parte terza che difendono la qualità della produzione industriale e tutelano i consumatori, fornirà elementi e supporti per la formazione professionale e industriale sulla certificazione dei prodotti e sulla gestione per la qualità delle aziende di Paesi in via di sviluppo coinvolte nel progetto in questione, a difesa anche della produzione industriale in Italia.

Nell'ambito del progetto di ricerca le Università di Tirana,

San Paolo, Tunisi (ENIT) e Tripoli è previsto che siano impegnate a:

- seguire le evoluzioni delle attività di ricerca sviluppate dalle Università di Palermo e Catania con il sostegno tecnico delle aziende coinvolte;
- collaborare con le proprie potenzialità alle predette attività di ricerca interpretando al meglio le esigenze tecnologiche del proprio Paese;
- essere di riferimento nel proprio Paese alle ditte e a agli utilizzatori delle tecnologie italiane, sia durante lo sviluppo del Progetto che successivamente, quali centri qualificati.

ESPERIENZE DI RICERCA MATURATE NEL SETTORE D'INTERVENTO

- Lo sviluppo del progetto è fondato su basi e contenuti scientifici consolidati da un'esperienza di ricerca pluriennale maturata presso il Dipartimento di Ingegneria Elettrica dell'Università di Palermo nel campo dell'automazione delle reti elettriche di distribuzione, della generazione distribuita di energia elettrica, del controllo e diagnostica degli azionamenti elettrici, della compatibilità elettromagnetica e dell'automazione dei sistemi elettrici all'interno degli edifici. Tutte queste competenze sono necessarie per il progetto di ricerca di cui si parla.

Attività svolta nel campo della automazione della distribuzione di energia elettrica

L'ottimizzazione dei flussi reattivi e la riconfigurazione automatica nelle reti elettriche di distribuzione a media tensione sono oggetto, già da parecchi anni, di studi e ricerche.

Con riguardo al problema di compensazione dei flussi reattivi, in [1], [2] è proposta una metodologia che consente di determinare il numero, la potenza e l'ubicazione delle sorgenti reattive per reti a media tensione a struttura radiale, sulla base della minimizzazione del costo annuo totale e nel rispetto dei vincoli di tensione ai nodi. Una volta dimensionate e allocate tali sorgenti in determinati nodi del sistema, si pone il problema di controllarne in tempo reale l'inserzione sulla rete, in dipendenza delle richieste di potenza attiva e reattiva da parte dei carichi. Con tale obiettivo sono state proposte diverse logiche di controllo, di tipo centralizzato, con l'applicazione di algoritmi evolutivi di tipo genetico [3] e distribuito, con controllori locali di tipo neuronale [4] e fuzzy [5].

L'approccio centralizzato, se da un lato è quello più naturalmente rispondente alla natura stessa del problema, dall'altro presenta i tradizionali limiti di tale tipo di controllo derivanti dalla frequenza delle interrogazioni dei nodi della rete da parte dell'unità centrale, nonché dalla perdita del controllo in caso di *down* del sistema di comunicazione. Tali limiti potrebbero essere superati con un *sistema di controllo integrato* articolato secondo due livelli gerarchici:

- una unità di elaborazione centrale (CCU), con compiti di supervisione e riconfigurazione del software di controllo al variare dello stato del sistema;
- un insieme integrato di intelligenze locali (LCU), preposte a gestire *on-line* lo stato delle batterie disinseribili sulla base di misure locali, effettuate direttamente sui nodi rifasati.

La realizzazione di un sistema di controllo integrato può consentire anche un'ampia flessibilità nello stanziamento dei mezzi finanziari da parte delle *utilities*, grazie alla possibilità di differire gli investimenti necessari in due fasi successive: una prima fase, in cui potrebbero essere installate le LCU con

un impegno economico abbastanza modesto e una seconda fase nella quale, utilizzando già in parte i benefici derivanti dall'attuazione del provvedimento precedente, potrebbero essere predisposti la CCU e la rete di comunicazione.

L'attuazione del controllo proposto presuppone naturalmente la possibilità di definire e mettere a punto unità elaborative, di semplice ed economica implementazione, in grado di esercitare efficacemente il controllo locale di ciascuna batteria di condensatori. Con tale obiettivo, in [4], è stata esplorata la possibilità di utilizzare controllori di tipo neurale. I soddisfacenti risultati ottenuti hanno indicato che, se opportunamente scelti i parametri di addestramento, la semplice architettura di una rete neurale MLP a tre strati ben si presta a tale tipo di applicazione. Altrettanto soddisfacenti i risultati ottenuti con la sperimentazione, in simulazione, di controllori basati sulla "fuzzy logic" [5].

La riconfigurazione automatica di reti di distribuzione MT a struttura radiale e ad assetto variabile è un'altra importante funzione che, si auspica, potrà trovare diffusa applicazione nel breve-medio termine per realizzare una gestione ottimale di tali sistemi. Lo scenario cui si fa normalmente riferimento è, ancora una volta, quello di un controllo di tipo centralizzato. Per limitare l'impatto del processo di adozione di tali logiche di controllo, si può pensare ad una progressiva introduzione di "intelligenza" distribuita in modo da migliorare le prestazioni di funzionamento, in vista di una eventuale, successiva, completa automazione della gestione. Il problema che si pone è quello di approssimare il controllo centralizzato della riconfigurazione mediante l'azione di controllori locali che, sulla base di informazioni raccolte nei punti di sezionamento, decidono sullo stato on-off di ogni sezionatore.

La ricerca in corso presso il Dipartimento di Ingegneria Elettrica di Palermo ha condotto ad un approccio al problema basato sull'impiego di reti neurali all'interno di una strategia che eviti il rischio - presente in un processo decentralizzato di riconfigurazione - di creazione di maglie e/o di isole [6]. La strategia di controllo decentralizzato messa a punto può essere operata in corrispondenza ad ogni sezionatore di rete sulla base di informazioni raccolte localmente. Allo scopo di evitare il rischio di creazione di isole di carico, la strategia proposta prevede che la chiusura del sezionatore venga controllata da una rete neurale opportunamente addestrata, mentre la sua apertura venga asservita ad una logica basata sull'individuazione di un eventuale punto di inversione delle correnti. La riconfigurazione della rete viene iniziata sulla base della risposta di una rete neurale (che può anche essere "errata"), ma termina sempre in maniera deterministica, ripristinando il corretto funzionamento della rete. Poiché ogni sezionatore ha due stati di funzionamento, e la transizione da uno all'altro è soggetta a due logiche diverse mutuamente escludentisi, è necessario prevedere un livello superiore di controllo del nodo che, sulla base dello stato dei sezionatori, coordini tutta l'attività di controllo. Nella strategia proposta la gestione dello stato dei sezionatori è quindi esercitata secondo due livelli gerarchicamente organizzati in:

- un supervisore di nodo, che, in dipendenza dello stato di ciascun sezionatore, seleziona il tipo di controllo da rendere attivo per ciascun sezionatore e svolge alcune funzioni addizionali rivolte alla correzione di errori di funzionamento;
- un controllore del sezionatore, di tipo ibrido, che attua il controllo in base a due logiche diverse la cui attivazione dipende dal precedente supervisore.

Per maggiori dettagli su tali aspetti e sull'intera strategia si rimanda al lavoro [6]. In un futuro scenario di completo sviluppo della automazione della distribuzione di energia

elettrica, ciascun supervisore di nodo può essere posto in comunicazione con una unità centrale, che costituirà il livello gerarchicamente più alto del controllo. Il controllo della configurazione potrà continuare ad essere effettuato localmente, lasciando all'unità centrale il compito di verificare il funzionamento dei controllori locali e l'avvio di procedure di riaddestramento delle reti neurali.

Attività svolta nel campo dei convertitori di potenza per la generazione distribuita di energia elettrica

Le esperienze di ricerca nel settore della generazione distribuita di energia elettrica maturate dai ricercatori del Dipartimento di Ingegneria Elettrica dell'Università di Palermo coinvolti nel Progetto di ricerca in questione, hanno riguardato:

1) nuovi dispositivi di disaccoppiamento per reti di distribuzione in presenza di convertitori statici c.c./c.a. e di GD;

2) lo studio, la progettazione, la realizzazione e la messa a punto di un prototipo di convertitore statico c.c./c.a. specifico per sistemi fotovoltaici con caratteristiche innovative in relazione alla robustezza e flessibilità del sistema di controllo, alle proprietà di interfacciamento con gli apparecchi utilizzatori o con la rete di distribuzione;

3) lo sviluppo di tecniche innovative di controllo finalizzate al massimo trasferimento di energia.

La ricerca condotta sul **tema 1**) è stata indirizzata all'analisi teorica e in simulazione di un nuovo dispositivo (CPD, Current Pumping Device) e di altri dispositivi basati sullo stesso principio di funzionamento e da esso derivanti, al fine di valutarne il comportamento nei seguenti casi:

a - sistemi elettrici alimentati attraverso convertitori statici c.c./c.a. in presenza di guasti o sovraccarichi;

b - reti di distribuzione in c.a. cui siano eventualmente connessi gruppi di generazione distribuita.

Con riferimento al punto a), le simulazioni effettuate hanno provato l'efficacia del nuovo dispositivo sia al manifestarsi di guasti, sia durante il transitorio di avviamento di un motore asincrono di taglia elevata [7], [8]. Per lo sviluppo di un primo prototipo del dispositivo (che è stato già realizzato), sono stati oggetto di studio: la scelta della tipologia dei componenti hardware più adatti a realizzare la logica di controllo definita, l'individuazione, tra quelli attualmente in commercio, dei componenti capacitivi più idonei a conseguire il miglior compromesso prestazioni-costi [9].

A partire dal CPD è stato concepito un altro dispositivo LC, denominato Fault Decoupling Device (FDD) che, disaccoppiando il sistema (a monte e a valle rispetto al punto d'inserzione) al manifestarsi di sovracorrenti, anche in presenza di gruppi di generazione di tipo sincrono, consente di: limitare il valore delle correnti di corto-circuito; mantenere la selettività dei dispositivi di protezione; mitigare gli effetti dei buchi di tensione generati da sovracorrenti; evitare la disconnessione indesiderata di gruppi di generazione distribuita eventualmente allacciati alla rete di distribuzione [10], [11], [12].

L'esperienza di cui al **punto 2)**, invece, si è concretizzata essenzialmente:

2.1 nello sviluppo e messa a punto di un nuovo algoritmo di modulazione e controllo di inverter a tensione impressa finalizzati all'impiego nell'ambito di sistemi fotovoltaici;

2.2 nella progettazione, realizzazione e messa a punto di un prototipo di inverter a tensione impressa finalizzato all'impiego nell'ambito di sistemi fotovoltaici e di un banco automatico di misure e prove per lo sviluppo e la verifica

sperimentale di nuove tecniche di controllo di inverter per sistemi fotovoltaici.

Il nuovo algoritmo di modulazione e controllo di inverter a tensione impressa finalizzati all'impiego nell'ambito di sistemi fotovoltaici, che è stato sviluppato e messo a punto [13], [14], [15], è basato sulla modulazione vettoriale, calcola direttamente il *duty cycle* e per mezzo di esso determina il "pattern" di modulazione per il pilotaggio dei dispositivi elettronici di potenza. Detto algoritmo permette all'inverter di lavorare in sovr modulazione e determina il passaggio dalla modulazione lineare alla sovr modulazione senza necessità di determinare il settore dell'esagono di funzionamento. Esso, inoltre, riduce il numero e la mole dei calcoli a carico del microprocessore con il vantaggio di un ridotto tempo di elaborazione permettendo, di conseguenza, di raggiungere la massima frequenza di commutazione ammessa dal convertitore. Tali caratteristiche rendono il nuovo algoritmo di modulazione idoneo per essere implementato su un semplice e robusto microprocessore commerciale da impiegare per il controllo di un azionamento elettrico alimentato da sistemi di conversione fotovoltaici.

Con riferimento al punto 2.2 sono stati realizzati un prototipo di inverter a tensione impressa di tipo aperto ed un banco di misura e prove per la verifica sperimentale dell'algoritmo proposto.

L'inverter a tensione impressa è stato realizzato mediante tre moduli ad *IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)* di tipo commerciale ed una scheda di controllo ed interfaccia realizzata appositamente dai ricercatori di Palermo per scopi di ricerca [14], [15]. Esso è del tipo aperto nel senso che sul microprocessore della scheda di controllo possono essere implementati di volta in volta gli algoritmi di controllo che si intendono verificare sperimentalmente. Alla scheda di interfaccia e controllo realizzata sono affidati i compiti di: ricevere come input i segnali di controllo elaborati dal DSP sulla base dell'algoritmo di controllo e elaborare i necessari tempi di protezione, che possono essere modificati dall'esterno; realizzare la protezione sulla base dei segnali diagnostici provenienti dal convertitore (sovracorrenti, sopra e sotto tensioni del DC-Link, etc); abilitare e disabilitare l'alimentazione di una o più fasi del carico simulando particolari condizioni di guasto per fini di studio.

I risultati dell'attività sperimentale condotta in laboratorio hanno consentito di verificare il buon funzionamento, sia in zona lineare che in sovr modulazione, dell'inverter controllato con il nuovo algoritmo di controllo. In particolare, l'algoritmo sviluppato permette di raggiungere la massima frequenza di commutazione e, essendo dotato di una ridotta mole di calcolo, presenta semplice implementazione sia su processori DSP che su microprocessori di tipo commerciale. Inoltre, il *range* di funzionamento in zona lineare è maggiore del 15% rispetto alla modulazione sinusoidale: caratteristica, questa, particolarmente utile per il corretto controllo della corrente negli impianti fotovoltaici.

L'esperienza di cui al **punto 3)**, ancora in corso di svolgimento, riguarda lo sviluppo e messa a punto di una nuova strategia di controllo di inverter VSI trifase per impianti di generazione fotovoltaica, che sfrutta il controllo della tensione ai capi della capacità sul lato dc ai fini del conseguimento del *Maximum Power Point Tracking (MPPT)*. La strategia di controllo MPPT proposta risulta idonea sia per impianti di tipo stand-alone che grid connected e presenta, rispetto alla strategia attualmente impiegata, la peculiarità di non utilizzare un "boost chopper", inserito tra il sistema di pannelli fotovoltaici e l'inverter, come attuatore del controllo

MPPT con diversi vantaggi conseguenti, quali semplificazione del sistema, riduzione del costo impianto, innalzamento del rendimento della conversione, maggiore affidabilità. L'efficacia del sistema di controllo MPPT messo a punto è stata già verificata mediante simulazioni in ambiente Matlab® e Simulink® [16] che hanno evidenziato, tra l'altro, buone prestazioni dinamiche anche a fronte sia di brusche variazioni di carico sia di cambiamenti delle condizioni meteorologiche (variazione della radiazione solare).

Attività svolta nei campi del controllo e diagnostica di azionamenti elettrici e della compatibilità elettromagnetica

Nell'ambito del controllo e diagnostica di azionamenti elettrici l'attività svolta ha riguardato:

1) lo sviluppo di un nuovo algoritmo di controllo per la minimizzazione delle perdite degli azionamenti con motore sincrono a magneti permanenti destinati ad applicazioni in cui sono richieste variazioni della velocità e della coppia;

2) lo sviluppo di processi diagnostici innovativi per azionamenti elettrici;

3) la focalizzazione delle problematiche connesse con la compatibilità elettromagnetica.

L'algoritmo di controllo di cui al **punto 1)** consente di ridurre sia le perdite nel ferro che quelle nel rame degli azionamenti con motore sincrono a magneti permanenti senza penalizzazione delle prestazioni dinamiche. Esso è stato prima validato mediante prove di simulazione in ambiente Simulink® [17] e successivamente mediante prove di laboratorio [18], [19]. I principali risultati delle prove sperimentali condotte hanno mostrato come, rispetto ai metodi tradizionali di controllo delle perdite, l'algoritmo proposto consente di incrementare in modo significativo (fino a 3,5 punti percentuali) il rendimento degli azionamenti con motore sincrono a magneti permanenti senza alcuna riduzione delle prestazioni dinamiche.

L'attività portata avanti nell'ambito del **punto 2)** ha riguardato gli azionamenti elettrici con motore asincrono e quelli con motore sincrono destinati alla propulsione di carrozzelle per disabili.

Con riferimento agli azionamenti con motore asincrono l'attività di ricerca svolta si è concretizzata nella definizione, sviluppo e messa a punto di una nuova procedura diagnostica che, basandosi sull'analisi delle vibrazioni, consente di individuare e monitorare guasti incipienti dovuti a barre di rotore rotte o parzialmente rotte [20]. Detta procedura, rispetto alle metodologie diagnostiche per la individuazione dei guasti incipienti dovuti alla rottura di barre di rotore già note in letteratura, presenta il vantaggio di essere in grado di individuare non solo la presenza di una barra rotta ma anche, seppure in modo approssimato, la entità della rottura della barra stessa, con il notevole vantaggio di poter tenere sotto controllo l'evoluzione del guasto.

Per quanto concerne gli azionamenti con motore sincrono è stato realizzato e messo a punto un nuovo sistema di protezione e diagnosi per azionamenti con motori sincroni per applicazioni nelle carrozzelle per disabili [21]. Tale sistema consente di effettuare sia il monitoraggio che la trasmissione a lunga distanza di segnali chiave che vengono utilizzati come indici di guasto e preguasto. La efficacia delle prestazioni del sistema è stata verificata sperimentalmente in un laboratorio di prova realizzato ad hoc e i risultati sperimentali mostrano l'affidabilità del sistema nella identificazione delle condizioni di guasto e preguasto previste, nella scelta della corretta azione protettiva e nella capacità di dialogare con un centro tecnico di controllo per migliorare le condizioni di sicurezza

del disabile.

L'attività di cui al **punto 3)** si è concretizzata: nella focalizzazione delle problematiche generali connesse con l'inquinamento elettromagnetico e la compatibilità elettromagnetica [22], [23], [24]; nell'esame critico delle leggi e delle norme tecniche sulla compatibilità elettromagnetica [25]; nella individuazione delle principali sorgenti di disturbo a bordo di un'automobile elettrica, considerando con particolare attenzione l'azionamento elettrico di propulsione e il carica batterie, e nella esecuzione delle misure di transitori elettrici condotti lungo le linee di alimentazione a 12 V di un prototipo di auto elettrica [26]; nello studio delle emissioni elettromagnetiche dei convertitori elettronici di potenza impiegati nei sistemi di trasporto ferroviario [27]; nella esecuzione in camera semianecoica di prove per la verifica della compatibilità elettromagnetica di sistemi elettrici innovativi installati a bordo di carrozzelle per la mobilità dei disabili e della compatibilità elettromagnetica biologica tra detti sistemi e il disabile che guida la carrozzella [28].

CONCLUSIONI

Il progetto di ricerca presentato nel lavoro, oltre ad aprire interessanti prospettive di cooperazione internazionale di natura culturale e commerciale, può avere rilevanti implicazioni sulle specifiche costruttive e sulle soluzioni attualmente adottate dalle imprese elettromeccaniche che operano nel settore della produzione di cabine elettriche di distribuzione MT/BT, di convertitori e gruppi di continuità.

Questi aspetti, nel progetto, costituiscono uno straordinario nodo di congiunzione fra i risultati della ricerca scientifica, la fattibilità tecnico-economica delle soluzioni prospettate, il recepimento e la concreta adozione da parte dell'industria elettrica di soluzioni innovative ad alto contenuto tecnologico e, non da ultimo, la diffusione e la più ampia affermazione in ambito internazionale dell'attività normativa nel settore elettrico.

RINGRAZIAMENTI

Questo lavoro è svolto nell'ambito del progetto "Ottimizzazione e automazione di cabine elettriche di distribuzione e di sistemi di produzione locale dell'energia elettrica a sostegno dell'innovazione della produzione di aziende elettromeccaniche siciliane per la penetrazione in mercati esteri", cofinanziato nell'ambito dell'accordo quadro siglato tra MAP (Ministero per le Attività Produttive), ICE (Istituto per il Commercio Estero) e CRUI (Conferenza dei Rettori delle Università Italiane).

Gli Autori ringraziano gli Enti sostenitori e i soggetti partecipanti.

BIBLIOGRAFIA

- [1] A. Augugliaro, L. Dusonchet, S. Mangione, Optimal Shunt Capacitor Allocation by Nonlinear Programming. *IEEE PWRD-2*, 1987, pp.1310-1316.
- [2] A. Augugliaro, V. Cataliotti, L. Dusonchet, S. Mangione, Pianificazione degli interventi per il rifasamento ottimo delle reti radiali di distribuzione MT. *L'Energia Elettrica*, 1989, n. 9 pp. 427-436.
- [3] V. Cataliotti, E. Riva Sanseverino, Compensazione Ottima di reti di distribuzione a mezzo di metodologie euristiche. *L'Energia Elettrica* – Vol. 74, n. 4, 1997
- [4] I. Arces, M.G. Ippolito, G. Morana, Optimal Capacitors On-line Operation on MV Radial Networks by an

- Integrated Control System Based on Local Neurocontrollers. *European Transactions on Electrical Power*, Vol.12, No.3, May/June 2002
- [5] I. Arces, M.G. Ippolito, G. Morana, G. Poma, E. Riva Sanseverino, A Genetic- Fuzzy System for the Local Control of Switched Capacitor Banks in Radial Compensated Networks. Proc. Of IASTED Power and Energy Systems, Las Vegas, Nevada – USA - Nov. 1999.
- [6] A. Augugliaro, L. Dusonchet, M.G. Ippolito, E.Riva Sanseverino, Minimum Losses Reconfiguration of MV Distribution Networks Through Local Control of Tie-Switches. *IEEE Trans. On Power Delivery*, July 2003, Vol. 18 n.3, pp, 762-771.
- [7] M.G. Ippolito, G. Morana, P. Pelacchi, Provvedimenti per migliorare la selettività delle protezioni nei sistemi BT alimentati da convertitori statici c.c./c.a. *L'Energia Elettrica*, Vol. 76 n.4, 1999.
- [8] A. Cataliotti, G. Cocchiara, M. G. Ippolito, G. Morana, A new device to reduce current limitation effects on LV distribution networks fed by power electronics dc/ac converters. Proc. of IASTED Euro-PES 2001, Rhodes, 3-6 July 2001
- [9] G. Cocchiara, M.G. Ippolito, G. Morana, Current Pumping Device: Technical and Economic Analysis of some Design Aspects. Proc. of CIRED2003, Barcellona, May 12-15, 2003.
- [10] G. Cocchiara, A. Campoccia, M.G. Ippolito, G. Morana, Fault Decoupling Device: a new device to reduce the impact of distributed generation on electric distribution system. Proc. of IEEE Power Tech 2003, Bologna, June 23-26, 2003.
- [11] A. Cataliotti, G. Cocchiara, M. G. Ippolito, G. Morana, A New Solution to Mitigate Voltage Dips on Electrical Distribution Systems: the Fault Decoupling Device. Proc. of SPEEDAM 2004, Symposium on Power Electronics, Electrical Driver, Automation and Motion, Capri, Italy, June 16-18, 2004.,
- [12] A. Cataliotti, G. Cocchiara, M. G. Ippolito, G. Morana, An Overview of a Novel LC Resonant Device Able to Improve Power Quality in Active and Passive Distribution Networks. Proc. of IEEE OPTIM04 – 9th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, Brasov, Romania, May 20-22, 2004.,
- [13] A. Cataliotti, F. Genduso, G. Ricco Galluzzo, A Novel Space Vector PWM Algorithm for High-Switching Frequency Vsi Drives Fed By Photovoltaic Array. EERR - Electrical Engineering Research Report, DEE – University of Naples “Federico II” , Number 13, April 2002.
- [14] A. Cataliotti, F. Genduso, G. Ricco Galluzzo, A New Over Modulation Strategy for High-Switching Frequency Space Vector PWM Voltage Source Inverters. Proc. of International Symposium on Power Electronic, IEEE ISIE 2002, L'Aquila 8-11 July 2002.
- [15] A. Cataliotti, F. Genduso, G. Ricco Galluzzo, A Novel Universal Control Algorithm for Carrier Based Pulse Width Modulation Techniques with efficient detection and management of Linear-Overmodulation Range. EERR - Electrical Engineering Research Report, DEE – University of Naples “Federico II”, N. 16, Dicembre 2003.
- [16] A. Cataliotti, F. Genduso, G. Ricco Galluzzo, MPPT Control System for three Phase Voltage Source Inverters [17] in PV Plants Without Boost – Chopper”, in corso di pubblicazione.
- [18] C. Cavallaro, A. O. Di Tommaso, R. Miceli, A. Raciti, G. Ricco Galluzzo, M. Trapanese, Efficiency Improvement of Inverter-Fed Permanent Magnet Synchronous Motors”, EEMODS '02 - ENERGY EFFICIENCY IN MOTOR DRIVEN SYSTEMS - 3RD International Conference, Treviso - Italy, September 18- 20, 2002, Francesco Parasiliti, Paolo Bertoldi Editors.
- [19] C. Cavallaro, A. O. Di Tommaso, R. Miceli, A. Raciti, G. Ricco Galluzzo, M. Trapanese, Analysis a DSP Implementation and Experimental Validation of a Loss Minimization Algorithm Applied to Permanent Magnet Synchronous Motor Drives, IECON 2003, the 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Roanoke VA (USA), November 2nd to 8th, 2003.
- [20] C. Cavallaro, A. O. Di Tommaso, R. Miceli, A. Raciti, G. Ricco Galluzzo, M. Trapanese, Efficiency Enhancement of Permanent Magnet Synchronous Motor Drives by on-Line Loss Minimization Approaches, accettato per la pubblicazione sulla rivista IEEE Transaction on Industrial Application.
- [21] C. Cavallaro, A. O. Di Tommaso, R. Miceli, A. Raciti, G. Ricco Galluzzo, M. Trapanese, Monitoring and Diagnoses by a Vibration Analysis Procedure of Incipient Failures in Squirrel Cage Induction Motors due to Cracked or Broken Bars, SPEEDAM 2004, Capri (Italy), June 16th - 18th.
- [22] C. Cavallaro, V. Di Dio, R. Miceli, A. Raciti, G. Ricco Galluzzo, Remote Diagnosis and Control of Wheelchair Electrical Drive Systems”, ICIT 2004, Hammamet, Tunisia, 8-10 dicembre 2004.
- [23] V. Cecconi: “Note sull’inquinamento elettromagnetico”, Primo corso di aggiornamento giuridico-ambientale, Palermo, gennaio-febbraio 1999. Pubblicazione interna.
- [24] V. Cecconi, UE, limiti all’esposizione durevole all’effetto dei campi elettromagnetici, pubblicato su “Edilizia e territorio”.
- [25] V. Cecconi, “Problemi di compatibilità elettromagnetica”, Azionamenti elettrici per l’automazione dei processi, Brescia, maggio 1999.
- [26] V. Cecconi, Leggi e norme tecniche sulla emc, Giornata di studio su “Regole e norme tecniche sulla EMC (compatibilità elettromagnetica)”. Università degli Studi di Palermo, Dipartimento di Ingegneria Elettrica, ottobre 1999.
- [27] V. Cecconi, M. C. Di Piazza, G. Ricco Galluzzo, G. Tinè, G. Vitale, Electric road vehicles and environment safety: the role of Electromagnetic Compatibility, 4th International Congress “Energy, Environment and Technological Innovation”, Roma, settembre 1999.
- [28] Cataliotti, V. Cecconi, A. Dell’Aquila, M.C. Di Piazza, P. Zanchetta, Investigation of low frequency EMI produced by inverter-fed linear induction motor drives in railway systems, “4th european symposium on electromagnetic compatibility”, Brugge, settembre 2000.
- [29] V. Cecconi, V. Di Dio, R. Miceli, G. Tinè, EMC Experimental Investigation of Wheelchairs on Board Innovative Electrical Systems for Disabled People Mobility, EERR - Electrical Engineering Research Report, DEE - University of Naples “Federico II”, N. 16, Dicembre 2003.