

# **Analisi del comportamento dinamico delle centrali idroelettriche.**

Autori:

A. Manunza - Studio M2EC, Paderno Dugnano (MI)

A. Maccioni - a2a, Impianti Idroelettrici, Grosio (SO)

## **Sommario**

<b>1</b>	<b>INTRODUZIONE.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>CASO DI STUDIO.....</b>	<b>2</b>
2.1	DESCRIZIONE DEL SISTEMA ELETTRICO.....	2
2.2	DISTURBO .....	2
<b>3</b>	<b>MODELLO AL CALCOLATORE .....</b>	<b>3</b>
3.1	CENTRALI IDROELETTRICHE.....	3
3.1.1	Centrale di Grosio.....	3
3.1.2	Centrale di Premadio .....	4
3.2	SISTEMA ELETTRICO.....	4
3.3	REGOLATORI DI FREQUENZA .....	5
3.4	REGOLATORI DI TENSIONE .....	6
3.5	RELÈ DI FREQUENZA .....	6
<b>4</b>	<b>RICOSTRUZIONE DEL TRANSITORIO .....</b>	<b>6</b>
4.1	CONDIZIONE INIZIALE .....	6
4.2	RISULTATI DELLA SIMULAZIONE.....	8
<b>5</b>	<b>PROPOSTE DI CAMBIAMENTO .....</b>	<b>9</b>
5.1	RISULTATI DELLA SIMULAZIONE.....	9
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONI.....</b>	<b>10</b>

## **1 Introduzione**

Lo studio del comportamento dinamico di un sistema elettrico ed in particolare di una centrale idroelettrica appartiene alla famiglia degli studi dei sistemi elettrici di potenza. Questi studi possono essere suddivisi in due grandi aree: gli studi statici e gli studi dinamici.

Alla prima area appartengono studi come il calcolo di load flow, di corto circuito e di analisi armonica. Ossia studi che permettono di congelare il

sistema in esame in un preciso istante ed in una precisa condizione e di evidenziarne le grandezze elettriche.

Viceversa gli studi dinamici permettono di studiare l'andamento nel tempo di tutte le grandezze elettriche e meccaniche, idrauliche in questo caso, durante un transitorio dovuto ad una perturbazione. Esistono vari tipi di transitori che vengono classificati indicativamente secondo la loro natura dai più lenti, come i transitori elettromeccanici, ai più veloci, quali i transitori elettromagnetici dovuti all'apertura di interruttori a vuoto.

Gli studi dinamici, evidenziando il comportamento di un sistema elettrico durante un transitorio, permettono di verificare il dimensionamento dei componenti in condizioni critiche, pianificare opportune contromisure, simulare strategie e verificarne la validità.

Si propone in questa sede lo studio dinamico del passaggio in isola di una porzione della rete italiana.

## **2 Caso di studio**

### **2.1 Descrizione del sistema elettrico**

Il parco di generazione dell'alta Valtellina, appartenente alla A2A S.p.A., è composto da un numero elevato di centrali idroelettriche di varia taglia. Queste producono una potenza totale di circa 700 MW a fronte di un consumo locale di circa 65 MW. Il sovrappiù di potenza è esportato dalla Valtellina tramite due linee a 220 kV in doppia terna, che dopo aver percorso la Val Camonica e la Val Seriana, giungono nei pressi della città di Milano dove alimentano una rete ad anello, collegata a sua volta alla rete Terna.

### **2.2 Disturbo**

Le attività di manutenzione delle linee AT vengono svolte solitamente nel periodo estivo su una doppia terna per volta: in queste condizioni la produzione è collegata al suo carico principale tramite un'unica linea che può essere soggetta a fulminazione proprio nel periodo estivo. Nell'estate del 2007, durante le opere di manutenzione di una linea, l'altra è stata colpita da un fulmine che ha portato all'intervento delle protezioni di guasto a terra ed alla conseguente apertura degli interruttori di linea. Il parco di generazione si è trovato istantaneamente separato dal suo carico principale, con un forte eccesso di produzione rispetto al consumo locale. Questo sovrappiù di potenza si è convertito in potenza accelerante delle masse rotanti, la frequenza dell'isola di rete è velocemente salita finché non sono intervenute le protezioni di sovra-frequenza che hanno portato al distacco di tutti i gruppi di generazione, con conseguente black out della zona.

Il modello al calcolatore ha permesso di riprodurre l'accaduto con buona approssimazione, come si vedrà dai diagrammi e dalla sequenza eventi. Inoltre ha permesso di verificare le contromisure proposte dagli autori. Si vedrà come sia possibile gestire anche questa forte perturbazione, mantenendo la continuità di servizio ed accettando un breve transitorio. Il sistema sarà poi in grado di effettuare velocemente il parallelo alla rete nazionale e riprendere la piena produzione .

### 3 Modello al calcolatore

Il sistema in esame è stato semplificato per poterlo riprodurre al calcolatore. Qui di seguito sono riportate le descrizioni dei principali componenti.

#### 3.1 Centrali idroelettriche

Sono state riprodotte nel dettaglio soltanto le centrali maggiori, ossia quelle di Grosio e Premadio. Inoltre sono stati aggiunti due generatori equivalenti, uno presso la sottostazione di Grosotto, che rappresenta la restante generazione della zona, ed uno presso quella di Tavazzano, equivalente alla rete nazionale.

##### 3.1.1 Centrale di Grosio

È composta da quattro gruppi di generazione, ognuno dei quali è costituito da una turbina Pelton ad asse verticale e da un generatore sincrono da 115 MVA.

Le turbine sfruttano un salto di circa 598 m ed una portata totale di 86.7 m<sup>3</sup>/s, per una potenza teorica totale di circa 509 MW. Ovviamente le turbine producono una potenza inferiore a causa del loro rendimento e di tutte le perdite idrauliche. Infatti in condizione di regime e tenendo una banda per la riserva rotante primaria, le turbine dei gruppi 1, 2 e 3 sviluppano all'albero una potenza di circa 102 MW, mentre la turbina del gruppo 4 sviluppa circa 108 MW. La differenza di rendimento tra il gruppo 4 e gli altri è dovuta al fatto che quello è equipaggiato con componenti di nuova generazione.

Il sistema idraulico della centrale può essere sinteticamente rappresentato come nella seguente figura 3-1.

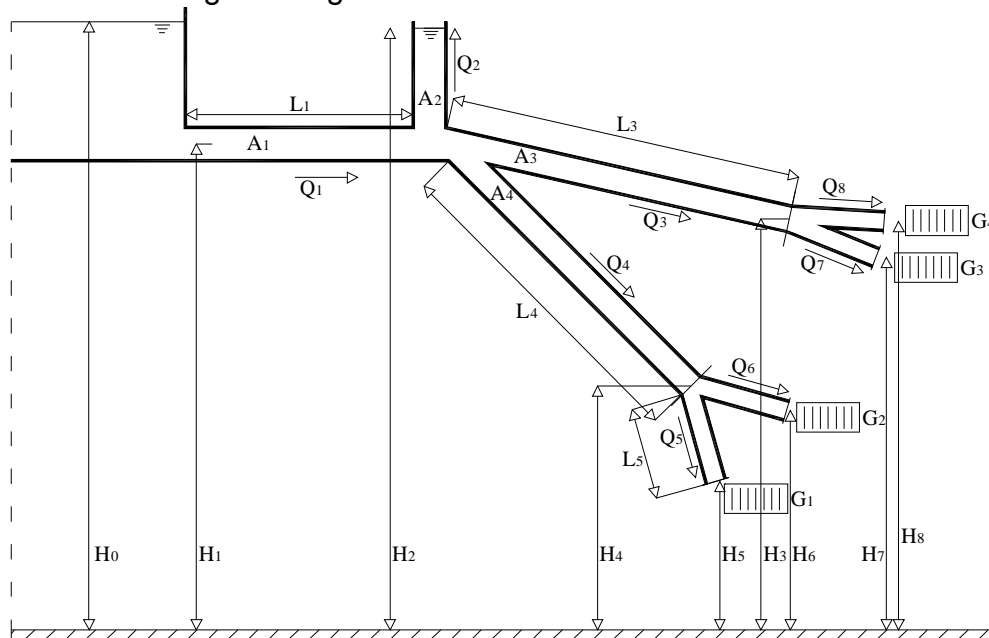


Fig. 3-1. Sistema idraulico di Grosio.

La diga di accumulo giornaliero di Valgrosina è collegata ad un complesso sistema di pozzi piezometrici tramite una galleria, lunga circa 3000 m. Da essa si dipartono due condotte forzate gemelle, lunghe circa 930 m, che a

loro volta si diramano in due brevi condotte ognuna e che vanno ad alimentare le turbine.

### 3.1.2 Centrale di Premadio

È composta da tre gruppi di generazione, ognuno dei quali è costituito da due turbine Pelton ad asse orizzontale e da un generatore sincrono da 95 MVA.

Le turbine sfruttano un salto di circa 672 m, quando l'invaso nella diga di Cancano è al suo livello massimo, ed una portata totale di  $39 \text{ m}^3/\text{s}$ , per una potenza teorica totale di circa 257 MW. In condizione di regime e tenendo una banda per la riserva rotante primaria, ogni turbina sviluppa all'albero circa 74 MW.

Il sistema idraulico della centrale può essere sinteticamente rappresentato come nella seguente figura 3-2.

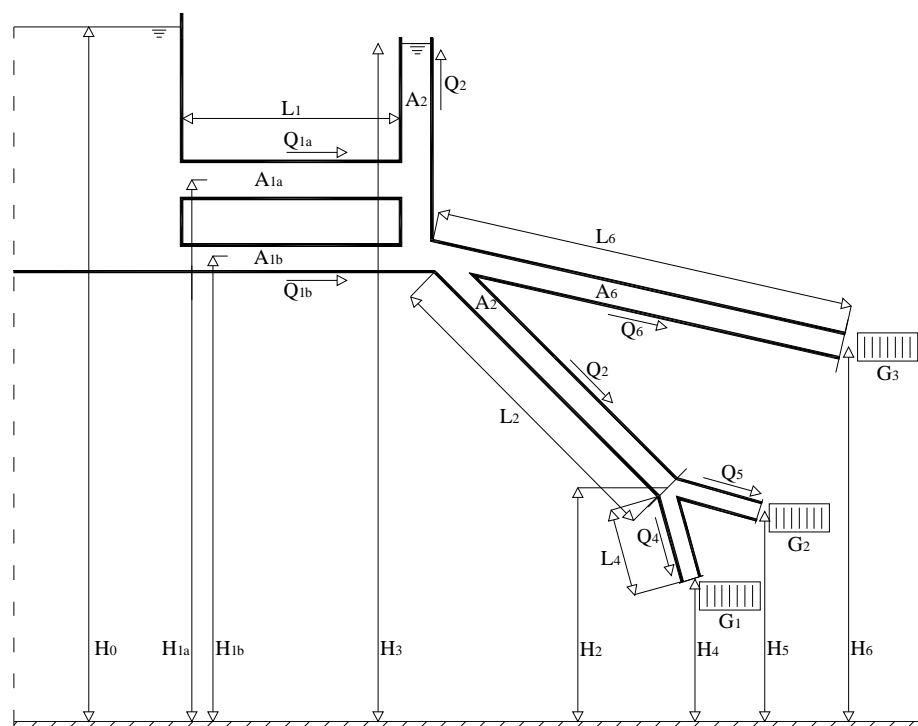


Fig. 3-2. Sistema idraulico di Premadio.

Dalla diga di Cancano partono due gallerie parallele, che giungono fino al pozzo piezometrico dopo un percorso lungo circa 3600 m. Dal pozzo e dopo le valvole a farfalla, partono due condotte forzate lunghe circa 900 m, una dedicata al gruppo 3 e l'altra relativa ai gruppi 1 e 2.

### 3.2 Sistema Elettrico

Lo schema elettrico unifilare semplificato è riprodotto nella figura 4-1, dove sono riportati anche i risultati del calcolo di load flow.

La centrale di Premadio è riportata in basso a sinistra, mentre quella di Grosio è in basso a destra. Dalle due centrali, che risultano interconnesse, partono le due linee in doppia terna. La prima linea arriva direttamente alla stazione Ricevitrice Sud di Milano, la seconda arriva alla Ricevitrice Nord, passando dalla stazione di Verderio. È poi rappresentato l'anello in AT che alimenta la città di Milano, comprendente la sottostazione di Cassano ed è collegato alla rete Terna tramite la stazione di Tavazzano.

### 3.3 Regolatori di frequenza

Il modello matematico dei regolatori di frequenza non può prescindere dal comportamento dinamico del circuito idraulico. Sono state considerate le equazioni differenziali che governano ogni suo componente, sono state trasformate secondo Laplace, convertite in funzioni di trasferimento ed opportunamente combinate per ricostruire l'intero sistema.

Le gallerie e le condotte forzate sono state rappresentate col modello semplificato della colonna d'acqua non elastica. Inoltre sono state trascurate le non-linearità dei distributori, mentre sono stati considerati le perdite distribuite, i limiti di velocità dei distributori, le non-linearità dei rendimenti delle turbine.

La seguente figura 3-3 riporta lo schema del circuito idraulico di Premadio. Si possono notare i modelli dinamici delle gallerie, del pozzo e delle condotte forzate, i distributori delle spine, i tegoli deviatori. Siccome il circuito idraulico è unico per tutte le turbine, non è possibile pensare di simulare un gruppo di generazione indipendentemente dagli altri.

Per ogni turbina poi sono presenti il regolatore di velocità con statismo del 4% e la possibilità di passaggio in regolazione isocrona.

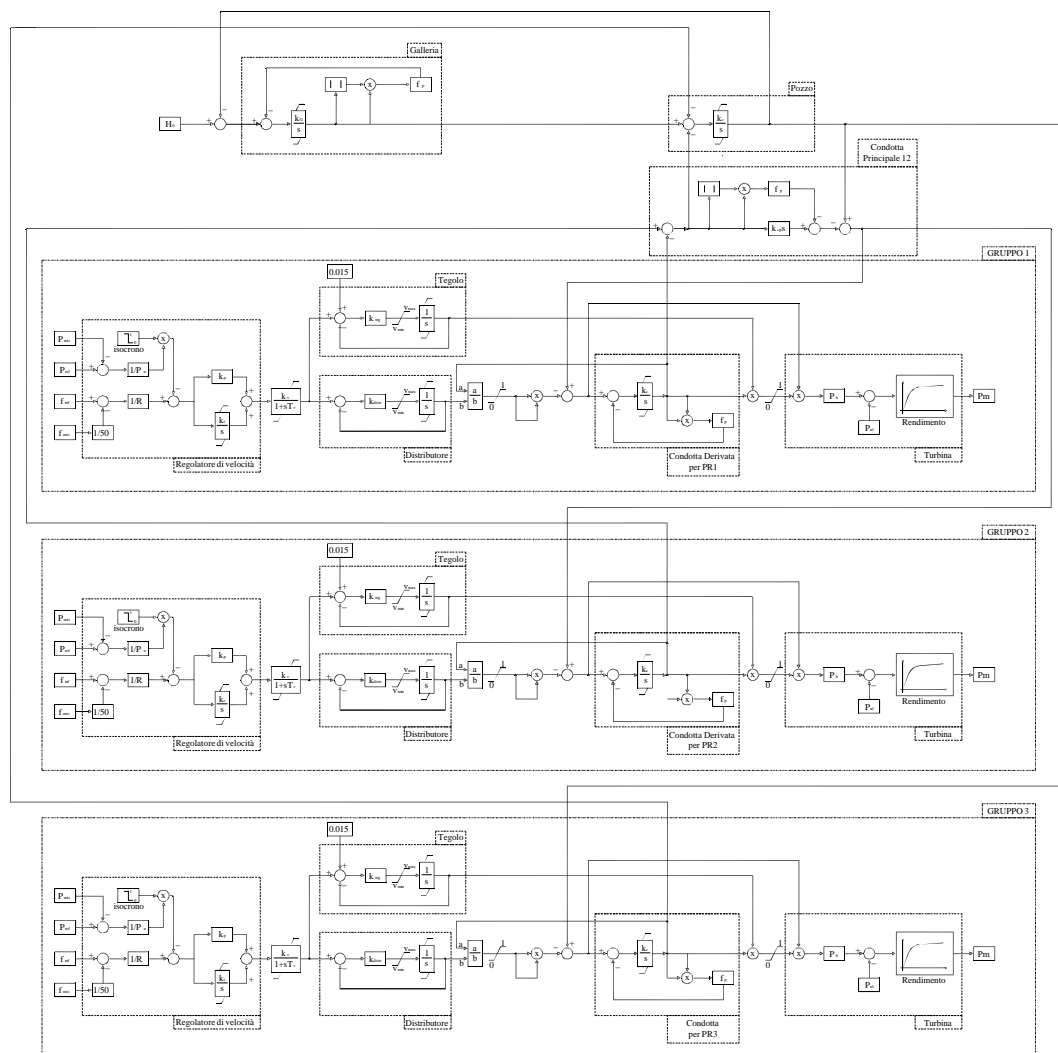


Fig. 3-3. Regolatore di frequenza di Premadio.

Durante la simulazione dinamica possono anche essere studiati gli andamenti nel tempo delle pressioni e delle portate nei punti più significativi del sistema.

### 3.4 Regolatori di tensione

Per ogni generatore è stato utilizzato il modello di regolatore DC1A indicato dalla normativa IEEE Std 421.5-2005. La figura 3-4 riporta lo schema a blocchi.

Benché questo regolatore sia molto semplice, si è dimostrato molto efficace. Inoltre poiché lo studio si concentra maggiormente sul transitorio di frequenza, non è stato necessario rappresentare i regolatori di tensione con modelli molto sofisticati.

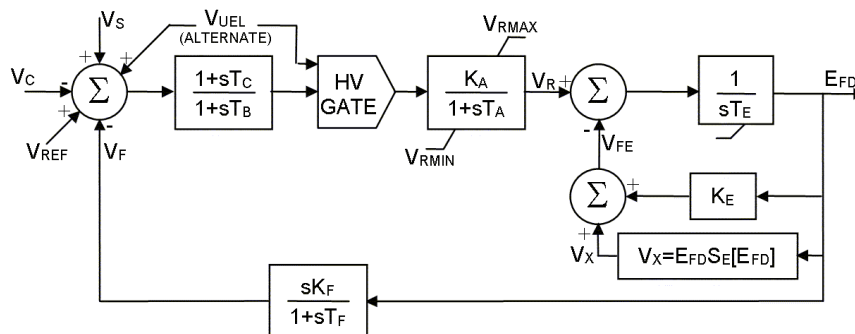


Fig. 3-4. Regolatore di tensione.

### 3.5 Relè di frequenza

Per poter simulare pienamente il comportamento dinamico del sistema in esame, sono stati aggiunti anche i relè di frequenza di Premadio (81> PR), di Grosio (81> GR) e di Grosotto (81> GRST), relativo quest'ultimo a tutti gli altri gruppi di generazione della zona. Le tarature attualmente implementate, uguali per tutti i generatori, sono le seguenti.

Soglia	Taratura (Hz)	Ritardo (s)	Azione
81>_1	50.3	0.1	Reg. isocrona
81>_2	52	2	Blocco Generatore

## 4 Ricostruzione del transitorio

È stata effettuata una prima simulazione per ricostruire quanto avvenuto nell'estate del 2007. Il confronto tra i risultati della simulazione e le registrazioni ha permesso di verificare la bontà del modello.

### 4.1 Condizione iniziale

La figura 4-1 riporta i risultati del calcolo di load flow relativo alla situazione del sistema in esame prima del verificarsi della fulminazione e della conseguente perdita dell'unica doppia terna AT in servizio (L4-L5). La condizione calcolata riproduce molto bene la situazione reale.

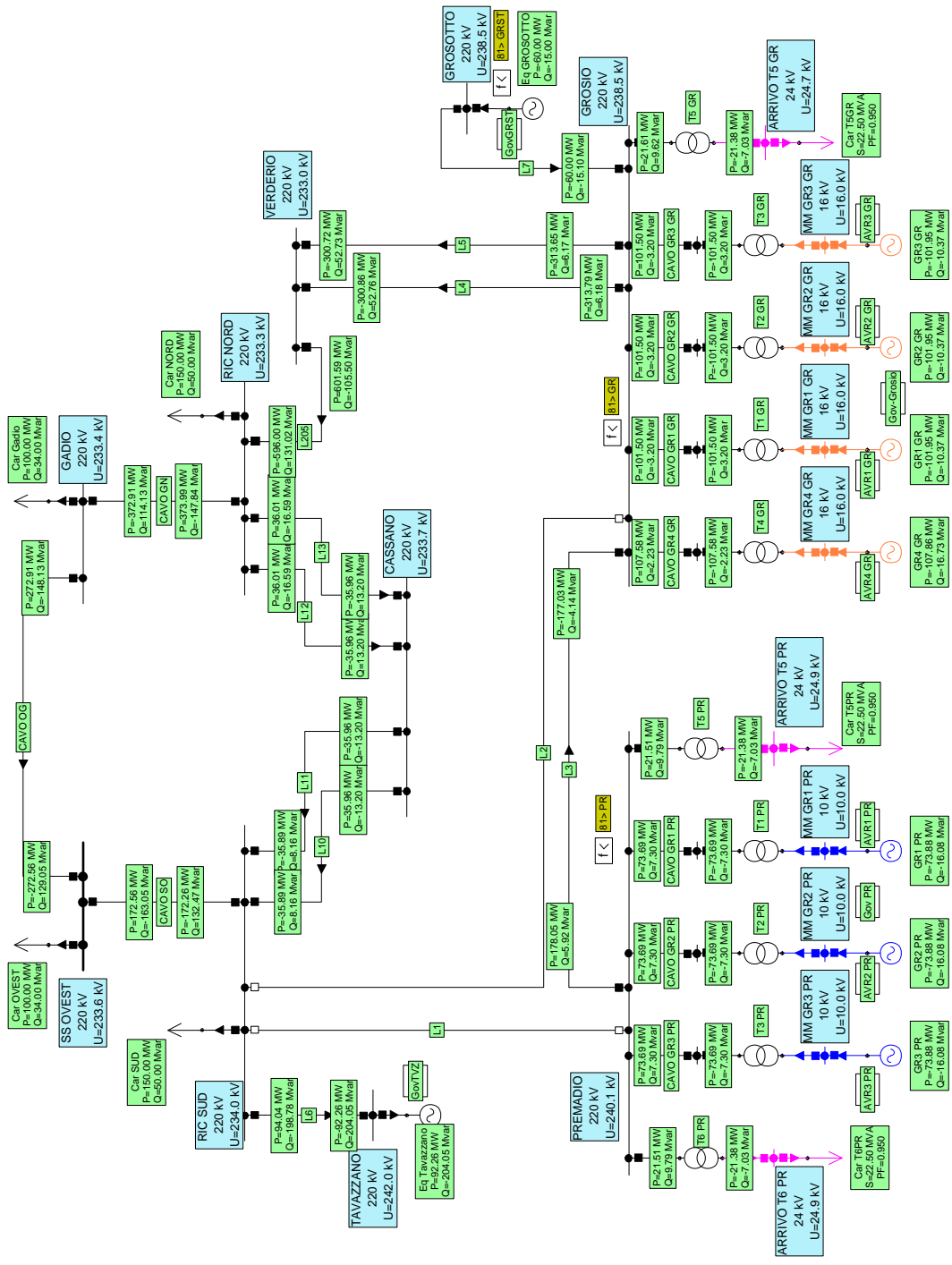


Fig. 4-1. Schema elettrico unifilare del sistema in esame e risultati del load flow iniziale.

## 4.2 Risultati della simulazione

Il disturbo che dà inizio al transitorio è la rapida e contemporanea apertura delle linee L4 e L5 per  $t=0.1$  s. La sequenza eventi è la seguente:

Tempo	Evento
0.100	: L4 (86) - OUT at both ends
0.100	: L5 (91) - OUT at both ends
0.228	: 81> GR (1808782) - trip stage 1
0.228	: 81> PR (1808789) - trip stage 1
0.328	: IsoGR4 (1808765) - IN
0.328	: IsoGR3 (1810785) - IN
0.328	: IsoGR2 (1810869) - IN
0.328	: IsoGR1 (1810827) - IN
0.328	: IsoPR1 (1808700) - IN
0.328	: IsoPR2 (1810625) - IN
0.328	: IsoPR3 (1809904) - IN
2.494	: 81> GR (1808782) - trip stage 2
2.494	: 81> GR (1808782) - trip stage 3
2.494	: 81> GRST (1808796) - trip stage 2
2.496	: 81> PR (1808789) - trip stage 2
2.594	: GR1 GR (351) - OUT
2.594	: GR2 GR (383) - OUT
2.594	: GR3 GR (415) - OUT
2.594	: GR4 GR (293) - OUT
2.594	: Eq GROSOTTO (615) - OUT
2.595	: GR2 PR (195) - OUT
2.595	: GR1 PR (224) - OUT
2.595	: GR3 PR (250) - OUT

Dopo 228 ms dall'apertura delle linee, si attiva la regolazione isocrona di tutti i generatori. Questa però non è in grado di rallentare la crescita della frequenza. I tegoli deviatori si muovono velocemente e per  $t=1.2$ s la potenza erogata dai generatori è nulla. Infatti si vede come la frequenza tenda a scendere. Ma questo non è sufficiente per evitare l'intervento della seconda soglia di frequenza e per  $t=2.59$ s i generatori sono tutti fuori servizio.

La figura 4-2 riporta i risultati della simulazione.

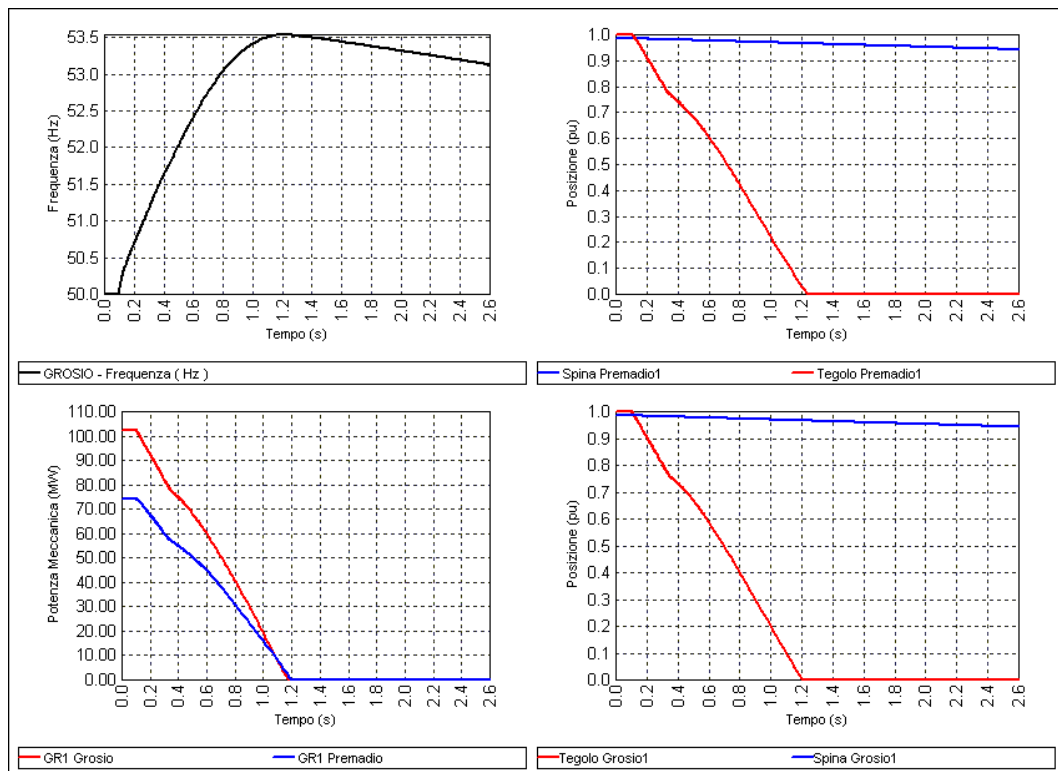


Fig. 4-2. Risultati della simulazione del caso reale.



## 5 Proposte di miglioramento

Dall'analisi dei risultati precedenti, si evidenziano i seguenti elementi:

1. Tutti i generatori di ogni centrale passano contemporaneamente dalla regolazione con statismo (proporzionale) alla regolazione isocrona (proporzionale + integrale). Questo può essere causa di oscillazioni indesiderate in caso di altro tipo di disturbo. Si propone che un solo generatore per centrale si porti in regolazione isocrona.
2. La soglia di frequenza a 52 Hz, ritardata di 2 s e che provoca il blocco di generatore, è la stessa per tutti i gruppi. Si propone di installare un apparato che, in funzione dei generatori in servizio, renda quasi istantanea la soglia (0.1 s), provocando non il blocco del generatore (86G), ma il rifiuto di carico (scatto 97G) di tutti i gruppi in servizio tranne uno. In questo modo, con l'apertura dell'interruttore AT e l'abbassamento del tegolo, si mantiene la macchina ai giri pronta ad entrare in parallelo immediatamente, in quanto il problema non risiede nella macchina, ma nella rete.
3. Inoltre si propone che, per la sola macchina destinata a rimanere in servizio tra le centrali di Grosio e Premadio (preferibilmente il gruppo 4 di Grosio perché dotato di apparecchiature più moderne), la soglia a 52 Hz sia posta a 54.5 Hz, ossia prima dell'intervento del centrifugo meccanico e con un ritardo pressoché nullo, a comandare lo scatto 97G della macchina.

### 5.1 Risultati della simulazione

Applicando le nuove proposte, è stata ripetuta la simulazione. Il disturbo iniziale è sempre l'apertura delle linee L4 e L5 per  $t = 0.1s$ . La sequenza eventi diventa la seguente:

Tempo	Evento
0.100	: L4 (86) - OUT at both ends
0.100	: L5 (91) - OUT at both ends
0.228	: 81> Grosio (1811275) - trip stage 1
0.228	: 81> Premadio (1811268) - trip stage 1
0.328	: IsoGR4 (1808765) - IN
0.328	: IsoPR3 (1809904) - IN
0.598	: 81> Grosio (1811275) - trip stage 2
0.598	: 81> Grosotto (1811282) - trip stage 2
0.600	: 81> Premadio (1811268) - trip stage 2
0.698	: GR1 GR (351) - OUT
0.698	: GR2 GR (383) - OUT
0.698	: GR3 GR (415) - OUT
0.698	: Eq GROSOTTO (615) - OUT
0.700	: GR2 PR (195) - OUT
0.700	: GR1 PR (224) - OUT
0.700	: GR3 PR (250) - OUT

Rispetto al caso precedente, si possono notare alcune differenze:

- Per  $t = 228$  ms si attiva la regolazione isocrona di un gruppo a Grosio ed uno a Premadio.
- Per  $t = 700$  ms il solo gruppo 4 di Grosio rimane in servizio.

I diagrammi della figura 5-1 mostrano come la frequenza

raggiunga il valore massimo di 52.7 Hz ed in circa 10 s il transitorio sia esaurito. Il transitorio di tensione vede un picco dovuto all'apertura delle linee, una successiva leggera depressione dovuta alla perdita dei generatori ed il ritorno ad un valore stabile ed accettabile dopo circa 5 s dal disturbo.

I risultati dimostrano che l'applicazione delle proposte porta ad evitare il black out, a mantenere alimentata la rete AT dell'alta Valtellina anche a seguito di un fortissimo disturbo, lasciando in servizio un gruppo di produzione e tutti gli altri pronti a rientrare in parallelo.

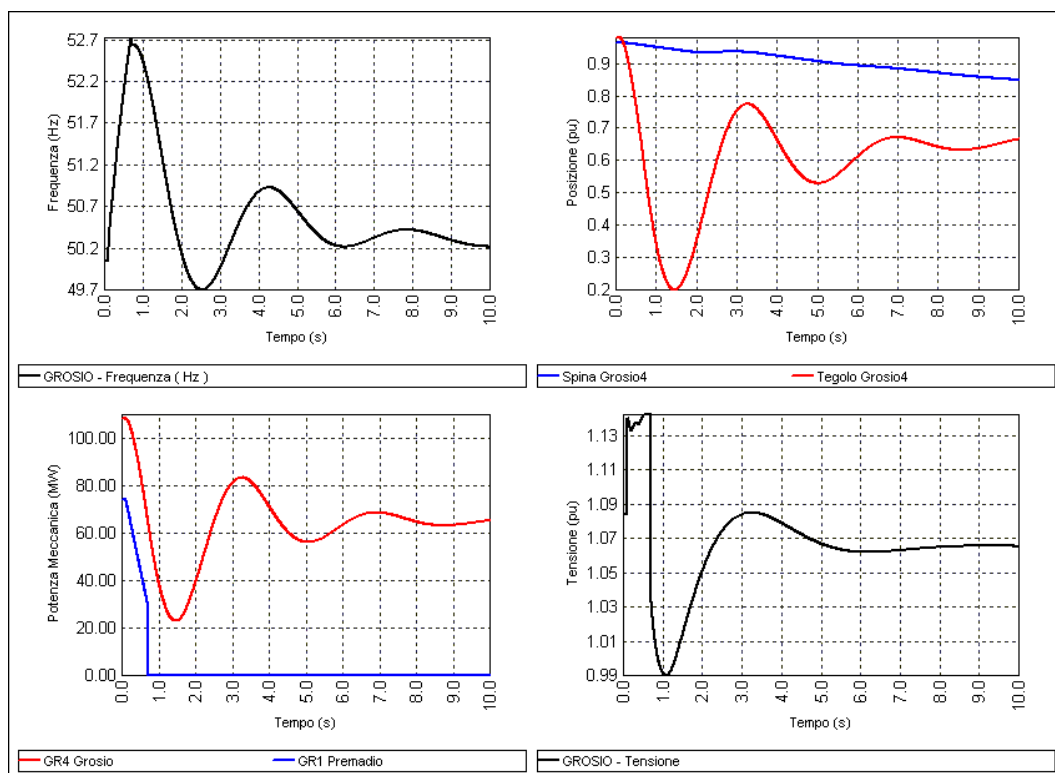


Fig. 5-1. Risultati della simulazione con implementazione delle proposte.

## 6 Conclusioni

Lo studio del comportamento dinamico delle centrali idroelettriche, la simulazione tramite opportuni mezzi di calcolo e la successiva analisi dei risultati permettono di evidenziare eventuali problematiche e di proporre opportune strategie, mirate ad incrementare la continuità e la qualità del servizio.

Si è presentato un caso realmente accaduto nella rete AT dell'alta Valtellina. Il fenomeno è stato riprodotto al calcolatore e questo ha permesso di evidenziare alcune problematiche nelle logiche di controllo. Sono state avanzate alcune proposte, che sono state poi implementate al calcolatore. Le successive simulazioni hanno dimostrato la validità di tali proposte, la cui implementazione nella realtà dovrà essere però oggetto di ulteriori e più approfondite analisi.