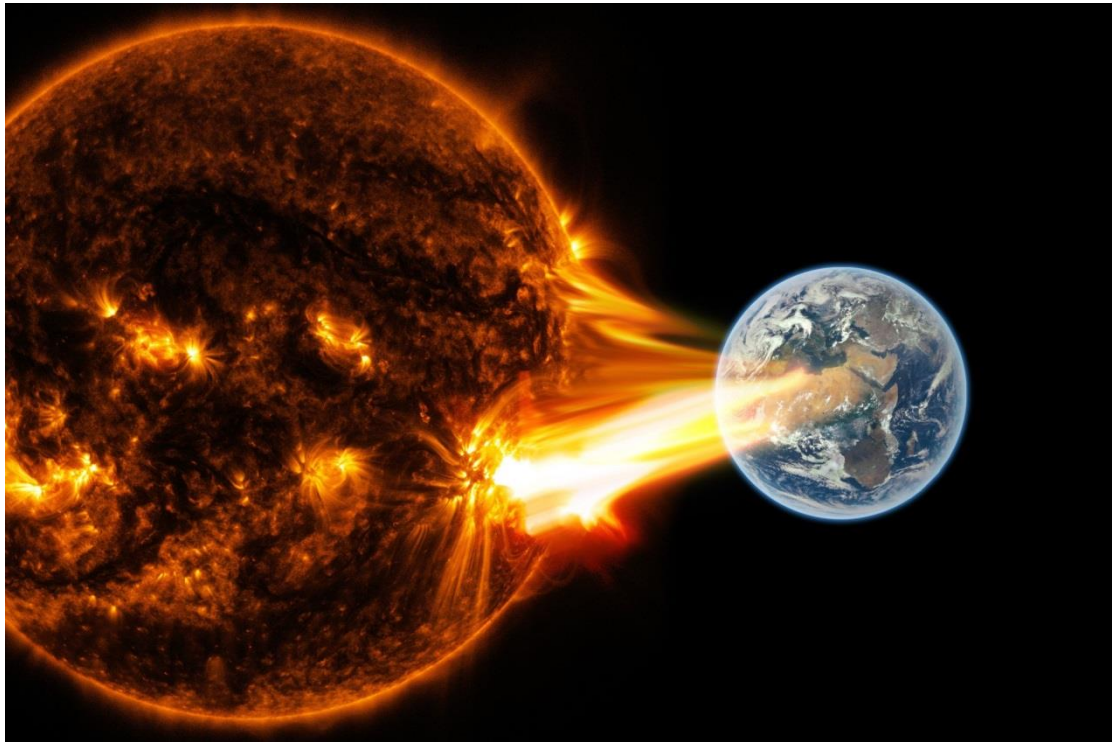


ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΗΛΙΑΚΩΝ ΚΑΤΑΙΓΙΔΩΝ ΣΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΑ
ΔΙΚΤΥΑ: ΠΡΩΤΟΛΕΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΙΑΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗΣ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ



ΣΤΥΛΙΑΝΟΣ ΦΩΤΙΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΕΛΟΣ 7910

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΕΠ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΘΩΜΑΣ Ε. ΤΣΟΒΙΑΗΣ



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΗΛΙΑΚΩΝ ΚΑΤΑΙΓΙΔΩΝ ΣΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΑ
ΔΙΚΤΥΑ: ΠΡΩΤΟΛΕΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΙΑΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗΣ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ

ΣΤΥΛΙΑΝΟΣ ΦΩΤΙΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΕΛΟΣ 7910

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΕΠ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΘΩΜΑΣ Ε. ΤΣΟΒΙΑΗΣ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2021

Πρόλογος

Το θέμα της παρούσας διπλωματικής είναι η μελέτη των επιπτώσεων των ηλιακών καταιγίδων σε ηλεκτρικά και τηλεπικοινωνιακά δίκτυα. Σκοπός της εργασίας είναι να αναδείξει τις επιπτώσεις των φαινομένων, τα οποία προέρχονται από τον Ήλιο, όπως εκτοξεύσεις στεμματικής ύλης ή εκλάμψεις, στις σύγχρονες τεχνολογίες των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας και τηλεπικοινωνιών.

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι κυρίαρχοι λόγοι και οπτικό υλικό, τα οποία καθιστούν αναγκαία τη μελέτη των επιπτώσεων ηλιακών φαινομένων στα σύγχρονα δίκτυα, από τη σκοπιά του μηχανικού, καθώς και η σχετική ορολογία.

Στο δεύτερο κεφάλαιο πραγματοποιείται ιστορική αναδρομή δίνοντας έμφαση στις αξιοσημείωτες ηλιακές καταιγίδες των τελευταίων ετών, αλλά και στην τελευταία ηλιακή καταιγίδα μεγάλου μεγέθους.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται μελέτη των επιπτώσεων των γεωμαγνητικών καταιγίδων σε ηλεκτρικά και τηλεπικοινωνιακά δίκτυα, όπως επίσης γίνεται ο υπολογισμός και η μοντελοποίηση των ηλιακών επαγόμενων ρευμάτων ενώ παράλληλα παρουσιάζονται αποτελέσματα θεωρητικών υπολογισμών.

Τέλος, στο τέταρτο κεφάλαιο, αναλύονται οι επιπτώσεις στα επίπεδα ρεύματος και τάσης στα ηλεκτρικά δίκτυα αλλά και οι τρόποι με τους οποίους μπορούμε να αντιμετωπίσουμε ανεπιθύμητα ηλιακά επαγόμενα ρεύματα.

Η εργασία αυτή δεν θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί χωρίς τη συνεχή καθοδήγηση του Επ. Καθ. Θωμά Ε. Τσοβίλη, για τον οποίο είμαι βαθύτατα ευγνώμων για την άψογη συνεργασία μας. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω και τον κ. Ε. Στάικο για τα σχόλια του επί του κειμένου της διπλωματικής εργασίας.

Η διπλωματική αυτή είναι αφιερωμένη στην μητέρα μου, την Αλεξία.

Στυλιανός Φώτιος Κωνσταντέλος

Θεσσαλονίκη, 2021

Περίληψη

Τα τελευταία 100 χρόνια, η τεχνολογία εξελίσσεται με ραγδαίους ρυθμούς πραγματοποιώντας τεχνολογικά άλματα. Συνεπώς, ο αριθμός των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων αλλά και των ηλεκτρικών δικτύων συνεχώς αυξάνεται όπως και η εξάρτηση του ανθρώπου από τέτοιου είδους συστήματα.

Για το λόγο αυτό, κρίνεται αναγκαία η μελέτη των επιπτώσεων των ηλιακών καταιγίδων στα συστήματα τηλεπικοινωνιών, όπως δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, ραντάρ, δορυφορικές συνδέσεις, αλλά και σε άλλα ηλεκτρονικά συστήματα. Η παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζει, από τη σκοπιά του μηχανικού, μερικούς από τους πιθανούς τρόπους, όπου φυσικά φαινόμενα στην επιφάνεια του Ηλίου μπορούν να επηρεάσουν σύγχρονες τηλεπικοινωνίες στη Γη με τρόπο καταστροφικό καθώς και κάποιες εκτιμήσεις για το πως μπορούμε να προστατέψουμε τα ηλεκτρικά δίκτυα ισχύος από τα φαινόμενα αυτά.

Abstract

In the last 100 years, technology has evolved rapidly, making technological leaps. As a result, the number of telecommunication systems and electrical networks is increasing and human dependence on such systems is huge.

For the reasons mentioned in the above paragraph, it is necessary to study the impact of solar storms on telecommunications systems, such as mobile networks, radar or satellite connections, but also on electrical and electronic systems. This dissertation presents some of the possible ways in which natural phenomena on the surface of the Sun can affect modern telecommunications on Earth in a destructive way but also how we could protect our electric power systems from such phenomena.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή	1
1.1 Ηλιακή δραστηριότητα.....	2
1.2 Το μαγνητικό πεδίο του Ήλιου	2
1.3 Διαστημικός καιρός.....	3
1.4 Το φαινόμενο της ηλιακής καταιγίδας.....	3
2. Ιστορική Αναδρομή	5
2.1 Γενικά.....	5
2.2 Γεωμαγνητικές καταιγίδες	6
2.2.1 Αξιοσημείωτα Γεγονότα	8
2.2.2 Η τελευταία ηλιακή καταιγίδα μεγάλου μεγέθους	10
3. Επιδράσεις γεωμαγνητικών καταιγίδων σε ηλεκτρικά και τηλεπικοινωνιακά δίκτυα.....	11
3.1 Γενικά.....	11
3.2 Ηλιακά επαγόμενα ρεύματα (SIC).....	12
3.3 Προβλήματα κορεσμού στους πυρήνες.....	14
3.4 Εσωτερική τοπική θέρμανση – Internal Localized Heating (ILH)	15
3.5 Υπολογισμός του ηλιακά επαγόμενου ρεύματος (SIC).....	17
3.5.1 Μοντελοποίηση του δικτύου	17
3.5.2 Ανάλυση του δικτύου	18
3.5.3 Αναλυτική εφαρμογή του μοντέλου για υπολογισμό του ηλιακά επαγόμενου ρεύματος (SIC).....	19
3.6 Αποτελέσματα θεωρητικών υπολογισμών	22
4. Επιπτώσεις, περιορισμός και αντιμετώπιση του ηλιακά επαγόμενου ρεύματος (SIC).....	23
4.1 Επιπτώσεις στα επίπεδα ρεύματος των ηλεκτρικών δικτύων	23
4.2 Επιπτώσεις στα επίπεδα τάσης των ηλεκτρικών δικτύων	26
4.3 Πρόβλεψη γεωμαγνητικών φαινομένων	28
4.4 περιορισμός του SIC.....	29

1. Εισαγωγή

Τα ηλεκτρικά δίκτυα και τα δίκτυα τηλεπικοινωνιών αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι της σύγχρονης κοινωνίας. Οι δικτυακές υποδομές αποτελούν τον βασικό πυλώνα, γύρω από τον οποίο είναι χτισμένο ένα σύνολο ζωτικών, για την κοινωνία, λειτουργιών, όπως οι επικοινωνίες μεταξύ των χρηστών, η ενοποίηση εφαρμογών, η μεταφορά πληροφορίας και ενέργειας.

Ιδιαίτερα σήμερα, όπου χρησιμοποιούμε ευαίσθητο ηλεκτρονικό εξοπλισμό, οι προκλήσεις για την ομαλή και αποτελεσματική λειτουργία τέτοιων συστημάτων, συνεχώς αυξάνονται, με αποτέλεσμα η αξιοπιστία τους να αμφισβητείται.

Παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν τη λειτουργία των δικτύων, είναι πιθανό να προέρχονται και από φαινόμενα τα οποία λαμβάνουν χώρα στον Ήλιο. Η συγκεκριμένη εργασία παρουσιάζει μερικούς από τους τρόπους, με τους οποίους ηλιακά φαινόμενα μπορούν να επηρεάσουν τα ηλεκτρικά και τα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα στη Γη, ώστε να συμβάλλει στην καλύτερη κατανόηση και αντιμετώπιση τέτοιων προκλήσεων.



Εικόνα 1. Η εικόνα ενός μετασχηματιστή της Public Service Electric and Gas Company μετά την έλευση μίας ηλιακής έκλαμψης τον Μάρτιου του 1989 [1].

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν τα γεγονότα της 13^{ης} Μαρτίου του 1989 όπου μία ηλιακή έκλαμψη κατέστρεψε ένα μετασχηματιστή αξίας 12 εκ. δολαρίων της Public Service Electric στο New Jersey των ΗΠΑ. Παρά το γεγονός ότι υπήρχε διαθέσιμος μετασχηματιστής ώστε να γίνει άμεσα αλλαγή, η πλήρης αντικατάσταση διήρκησε 2 εβδομάδες [1].

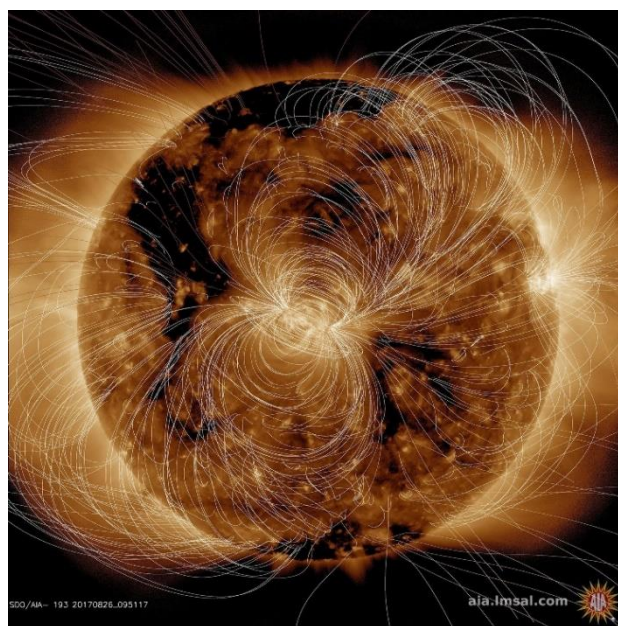
1.1 Ηλιακή δραστηριότητα

Η ηλιακή δραστηριότητα αποτελείται από ένα σύνολο φαινομένων που λαμβάνουν χώρα στον Ήλιο, όπως ηλιακές εκλάμψεις, εκτοξεύσεις στεμματικής ύλης (CME), ηλιακοί άνεμοι υψηλής ταχύτητας κ.ά. Το ηλιακό μαγνητικό πεδίο είναι υπεύθυνο για τη διαμόρφωση της ηλιακής δραστηριότητας [2].

1.2 Το μαγνητικό πεδίο του Ήλιου

Ο Ήλιος αποτελείται από υλικό, το οποίο βρίσκεται υπό τη μορφή πλάσματος λόγω των πολύ υψηλών θερμοκρασιών του. Η περιστροφή αυτού του αγώγιμου υλικού παράγει το μαγνητικό του πεδίο, το οποίο ονομάζεται ηλιακό. Επιπρόσθετα, ο Ήλιος έχει την ικανότητα να περιστρέφεται γρηγορότερα στον ισημερινό του από ότι σε υψηλότερα γεωγραφικά πλάτη. Το γεγονός αυτό ωθεί τις γραμμές του μαγνητικού πεδίου, να τέμνονται μεταξύ τους προκαλώντας βρόχους και εκρήξεις στην επιφάνεια του.

Το ηλιακό μαγνητικό πεδίο είναι ένα ισχυρό εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο, το οποίο αλλάζει συναρτήσει του χρόνου, ενώ μπορεί να αναστρέψει την πολικότητά του. Η διαδικασία κατά την οποία ο Ήλιος αναστρέφει την πολικότητα του ονομάζεται ηλιακός κύκλος και διαρκεί κατά μέσο όρο 11 έτη. Από το 1744 και έπειτα κάθε ηλιακός κύκλος έχει και ένα αριθμητικό δείκτη, ώστε να διακρίνεται από τους υπόλοιπους [3].



Εικόνα 2: Το μαγνητικό πεδίο του ήλιου από το Solar Dynamics Observatory (SDO) της NASA [4].

1.3 Διαστημικός καιρός

Με τον ίδιο τρόπο που οι καιρικές συνθήκες και το κλίμα περιγράφουν τις συνθήκες στην κατώτερη ατμόσφαιρα της Γης, ο «διαστημικός καιρός» περιγράφει όλα τα γεγονότα τα οποία συμβαίνουν στην ανώτερη ατμόσφαιρά της. Σε αυτά περιλαμβάνονται γεγονότα, τα οποία συμβαίνουν στον Ήλιο, στον ηλιακό άνεμο αλλά και στο διάστημα κοντά στη Γη και δύνανται να επηρεάσουν τα διαστημικά και επίγεια τεχνολογικά συστήματα και κατ' επέκταση την ανθρώπινη ζωή [5].

1.4 Το φαινόμενο της ηλιακής καταιγίδας

Οι ηλιακές καταιγίδες αποτελούνται από τρία κύρια μέρη, τις ηλιακές εκλάμψεις (solar flares), τα solar particle events ή solar proton events (SPE) και τις εκτοξεύσεις στεμματικής ύλης (CME). Οι εκτοξεύσεις στεμματικής ύλης έχουν την ικανότητα να αλληλοεπιδράσουν με το μαγνητικό πεδίο της Γης και να δημιουργούν γεωμαγνητικές καταιγίδες. Δεν είναι απαραίτητο ότι κάθε ηλιακή καταιγίδα θα παράγει και τα τρία μέρη που αναφέρονται παραπάνω, ωστόσο οι μεγαλύτερες σε μέγεθος καταιγίδες, τείνουν να παράγουν και τα τρία [1].

Τα κύρια μέρη των ηλιακών καταιγίδων:

- **Ηλιακές εκλάμψεις:** Πρόκειται για μεγάλες εκρήξεις στην επιφάνεια του Ηλίου. Μία ισχυρή έκρηξη ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας υπό τη μορφή ακτινών Χ, υπεριωδών ακτινών και ακτινών γάμμα, μπορεί να κατευθυνθεί προς τη Γη. Μία ηλιακή έκλαμψη χρειάζεται περίπου 8 λεπτά για να διασχίσει την απόσταση από τον Ήλιο στη Γη.
Οι ηλιακές εκλάμψεις ταξινομούνται ανάλογα με τη φωτεινότητά τους στο μήκος κύματος των ακτινών Χ σε 3 κλάσεις (X-class, M-class, C-class), όπως φαίνεται στον πίνακα 1. Οι εκλάμψεις κατηγορίας C είναι πολύ μικρές και έχουν ελάχιστες αξιοσημείωτες επιπτώσεις στη Γη. Οι εκλάμψεις κατηγορίας M είναι μεσαίου μεγέθους και μπορούν να προκαλέσουν ήπιες επιπτώσεις (π.χ. σύντομο blackout στο ραδιόφωνο σε πολικές περιοχές). Τέλος, οι εκλάμψεις κατηγορίας X είναι οι πιο ισχυρές από τις τρεις και μπορούν να προκαλέσουν αρκετές ζημιές, όπως διακοπές ρεύματος σε μεγάλη κλίμακα και θύελλες ακτινοβολίας στην ανώτερη ατμόσφαιρα.

Πίνακας 1: Ταξινόμηση των ηλιακών εκλάμψεων σε κλάσεις, βάσει της ακτινοβολίας προς στη Γη [1].

Class	Peak Flux Watts/meter ² (100-800 picometer x-rays near Earth)	Class	Peak Flux Watts/meter ² (100-800 picometer x-rays near Earth)
M1	$0.1 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2$	X1	$1.0 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2$
M2	$0.2 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2$	X2	$2.0 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2$
M3	$0.3 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2$	X3	$3.0 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2$
M4	$0.4 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2$	X4	$4.0 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2$
M5	$0.5 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2$	X5	$5.0 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2$
M6	$0.6 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2$	X6	$6.0 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2$
M7	$0.7 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2$	X7	$7.0 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2$
M8	$0.8 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2$	X8	$8.0 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2$
M9	$0.9 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2$	X9	$9.0 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2$

- Εκτοξέυσεις στεμματικής ύλης (CME):** Τα CMEs είναι τεράστια σύννεφα αερίου, το οποίο βρίσκεται σε πολύ υψηλή θερμοκρασία, και πλάσματος, το οποίο είναι φορτισμένο με σωματίδια χαμηλής έως μέσης ενέργειας. Όταν ένα CME κατευθυνθεί προς τη Γη, το μαγνητικό πεδίο και το πλάσμα που υπάρχει σε αυτό, προσπίπτει στο μαγνητικό πεδίο της Γης. Αυτή η διαταραχή του μαγνητικού πεδίου της Γης ονομάζεται γεωμαγνητική καταιγίδα. Ο προσανατολισμός του μαγνητικού πεδίου της Γης διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στις επιπτώσεις της γεωμαγνητικής καταιγίδας.
- Solar particle event ή Solar proton event (SPE):** Συμβαίνουν όταν τα πρωτόνια τα οποία εκπέμπονται από τον ήλιο, επιταχύνονται κατά τη διάρκεια ενός CME ή μίας ηλιακής έκλαμψη. Η μάζα του CME είναι το κυρίαρχο χαρακτηριστικό για τη δημιουργία ενός SPE. Όσο μεγαλύτερο είναι το CME, τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα εμφάνισης του SPE [1].

2. Ιστορική Αναδρομή

2.1 Γενικά

Στις αρχές του 19^{ου} αιώνα, ο Alexander von Humboldt κατέγραψε τις κινήσεις του ρουλεμάν μιας μαγνητικής πυξίδας στο Βερολίνο. Ο Humboldt παρατήρησε ότι η πυξίδα του είχε γίνει ακανόνιστη κατά τη διάρκεια ενός φωτεινού ακουστικού γεγονότος. Αυτή ήταν η πρώτη επιστημονική παρατήρηση των επιπτώσεων μιας γεωμαγνητικής καταιγίδας.

Ιστορικά, σφοδρές γεωμαγνητικές καταιγίδες έχουν οδηγήσει στη διακοπή των ραδιοεπικοινωνιών, πυρκαγιές σε δίκτυα τηλεγραφίας και προβλήματα σηματοδότησης κατά μήκος των σιδηροδρόμων, σε παγκόσμια κλίμακα. Ωστόσο, οι μεγάλες αυτές καταιγίδες σημειώθηκαν πριν από την πρόσφατη ταχεία εξάπλωση των ηλεκτρικών δικτύων, τα οποία αποτελούν ουσιαστικό μέρος της σύγχρονης κοινωνίας. Το φαινόμενο αυτό, οδηγεί σε μία αβεβαιότητα σχετικά με τις επιπτώσεις που μπορεί να έχει μία γεωμαγνητική καταιγίδα ακραίου μεγέθους στα σύγχρονα ηλεκτρικά δίκτυα και τηλεπικοινωνίες .

Στις 1-2 Σεπτεμβρίου 1859, σημειώθηκε η μεγαλύτερη καταγεγραμμένη γεωμαγνητική καταιγίδα. Από τις 28 Αυγούστου έως τις 2 Σεπτεμβρίου 1859, παρατηρήθηκαν πολλές ηλιακές κηλίδες και ηλιακές εκλάμψεις στον Ήλιο, με τη μεγαλύτερη έκλαμψη να λαμβάνει χώρα την 1η Σεπτεμβρίου. Το γεγονός αυτό, αναφέρεται ως η ηλιακή καταιγίδα του 1859 ή ως Carrington Event. Η επικρατέστερη υπόθεση είναι, ότι ένα CME εκτοξεύτηκε από τον Ήλιο και έφτασε στη Γη μέσα σε δεκαοκτώ ώρες, ένα ταξίδι που συνήθως διαρκεί τρεις έως τέσσερις ημέρες. Εκτιμάται πως η τιμή της μεταβολής του γεωμαγνητικού δείκτη Dst, που καταγράφηκε από το παρατηρητήριο Colaba ήταν από -800 nT έως -1750 nT [6].

Στις ΗΠΑ αλλά και στην Ευρώπη, τα καλώδια τηλεγραφίας εμφάνισαν επαγόμενες υπερτάσεις, και σε ορισμένες περιπτώσεις ακόμη προκλήθηκαν πυρκαγιές. Στο Μεξικό, στην Κούβα, στην Ιταλία και στην Νότια Χαβάη παρατηρήθηκε το φαινόμενο του Σέλας (Aurorae), το οποίο είναι συνήθως ορατό μόνο σε πολικές περιοχές. Στοιχεία τα οποία βρίσκονται στους πολικούς πάγους, δείχνουν ότι γεγονότα παρόμοιας έντασης επαναλαμβάνονται με μέσο ρυθμό περίπου μία φορά ανά 500 χρόνια [7].

2.2 Γεωμαγνητικές καταιγίδες

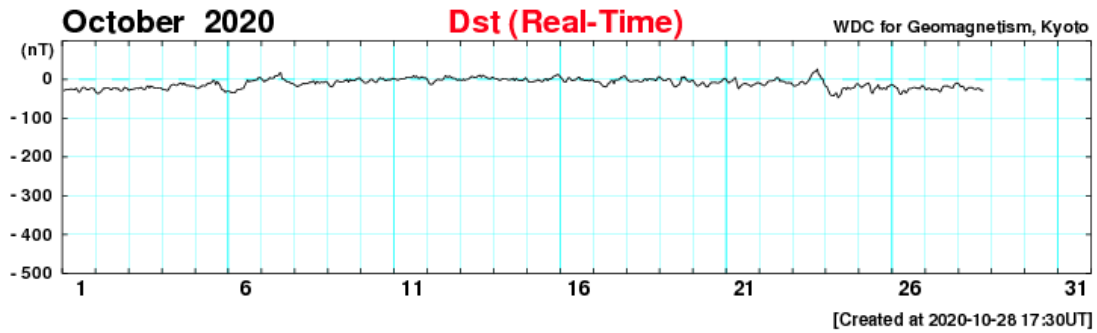
Οι γεωμαγνητικές διαταραχές (Geomagnetic disturbances ή GMDs) στη Γη, οι οποίες προέρχονται από τον Ήλιο, προκαλούν αργά μεταβαλλόμενα ρεύματα, τα οποία ρέουν στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, μεταλλικές γραμμές επικοινωνίας, σιδηροδρόμους και αγωγούς. Υπό ορισμένες συνθήκες, τα ρεύματα μπορούν να διαταράξουν την ομαλή λειτουργία αυτών των υποδομών και κατ' επέκταση να επηρεάσουν τις κοινωνίες που εξαρτώνται από αξιόπιστες παροχές ηλεκτρικής ενέργειας. Για το λόγο αυτό, η ασφάλεια και η αξιοπιστία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας απαιτούν την προσοχή των υπηρεσιών κοινής ωφελείας και του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται.

Μία γεωμαγνητική καταιγίδα μπορεί να οριστεί ως μία αλλαγή του μαγνητικού πεδίου H (ή του πεδίου B σε Tesla) στην επιφάνεια της Γης, η οποία προκλήθηκε από αλληλεπιδράσεις στη μαγνητόσφαιρα ή την ιονόσφαιρά της. Το επαγόμενο ηλεκτρικό πεδίο E (V/m) σχετίζεται άμεσα με το ρυθμό μεταβολής του πεδίου B και την αγωγιμότητα του φλοιού της Γης. Χαμηλότερες αγωγιμότητες προκαλούν υψηλότερα ηλεκτρικά πεδία E , για την ίδια μεταβολή του μαγνητικού πεδίου B .

Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να γίνει διάκριση μεταξύ ηλιακών εκλάμψεων και γεωμαγνητικών καταιγίδων. Οι ηλιακές εκλάμψεις είναι εκρήξεις ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, οι οποίες είναι ορατές, βρίσκονται στο φάσμα των ραδιοσυχνοτήτων και διαδίδονται με την ταχύτητα του φωτός. Κύριο αίτιο ηλιακών εκλάμψεων είναι οι ηλιακές κηλίδες και συνήθως επηρεάζουν τις επικοινωνίες αυξάνοντας τα επίπεδα θορύβου. Τα CMEs, τα οποία δεν είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, είναι υπεύθυνα για τη δημιουργία γεωμαγνητικών καταιγίδων [8].

Οι αλλαγές στο γεωμαγνητικό δείκτη Dst (Disturbance storm time) περιγράφουν μία γεωμαγνητική καταιγίδα. Ο γεωμαγνητικός δείκτης Dst αξιολογεί τα H (οριζόντια), D (κάθετα) και Z (η γωνία μεταξύ του H και του μαγνητικού πεδίου), τα οποία είναι τα τρία διανυσματικά στοιχεία του μαγνητικού πεδίου που προκύπτουν από τα παρατηρητήρια εδάφους [9].

Ο γεωμαγνητικός δείκτης Dst υπολογίζει τη μέση τιμή της μεταβολής του οριζόντιου στοιχείου H του μαγνητικού πεδίου της Γης στον ισημερινό, με βάση τις μετρήσεις από συγκεκριμένους σταθμούς μαγνητόμετρων. Επιπρόσθετα, ο δείκτης Dst υπολογίζεται μία φορά την ώρα και αναφέρεται σε σχεδόν πραγματικό χρόνο. Αρνητικές τιμές στον δείκτη Dst δείχνουν ότι το μαγνητικό πεδίο της Γης έχει εξασθενήσει. Υπό κανονικές συνθήκες ο δείκτης Dst κυμαίνεται μεταξύ +20 nT και -20 nT. Με βάση το δείκτη Dst , οι γεωμαγνητικές καταιγίδες κατηγοριοποιούνται σε μέτριες (-50nT έως -100nT), έντονες (-100nT έως -250nT) ή υπερκαταιγίδες (μικρότερο του -250nT) [10], [11].



Εικόνα 3: Ενδεικτικά, ο δείκτης Dst σε πραγματικό χρόνο για τον μήνα Οκτώβριο του 2020 υπό κανονικές συνθήκες [12].

Μία γεωμαγνητική καταιγίδα αποτελείται από 3 φάσεις:

- Αρχική
- Κύρια
- Αποκατάσταση

Η αρχική φάση χαρακτηρίζεται από αύξηση, κατά απόλυτη τιμή, του δείκτη Dst κατά 20 έως 50 nT μέσα σε δεκάδες λεπτά και είναι γνωστή και ως ξαφνική έναρξη θύελλας (storm sudden commencement). Αυτή η φάση είναι προαιρετική καθώς δεν εντοπίζεται σε όλες τις γεωμαγνητικές καταιγίδες. Ωστόσο, αύξηση του δείκτη Dst δεν συνεπάγεται απαραίτητα μία επακόλουθη γεωμαγνητική καταιγίδα.

Η κύρια φάση μίας γεωμαγνητικής καταιγίδας ορίζεται από το δείκτη Dst που μειώνεται σε μικρότερο από -50 nT. Το όριο των -50 nT είναι αυθαίρετο. Η ελάχιστη τιμή κατά τη διάρκεια μίας καταιγίδας είναι μεταξύ -50 και περίπου -600 nT. Η διάρκεια της κύριας φάσης είναι συνήθως 2 έως 8 ώρες. Όταν ο δείκτης Dst αλλάζει από την ελάχιστη τιμή του στην τιμή του ήσυχου χρόνου, πρόκειται για τη φάση αποκατάστασης. Η φάση αποκατάστασης μπορεί να διαρκέσει από 8 ώρες έως και 7 ημέρες [13].

2.2.1 Αξιοσημείωτα Γεγονότα

Παρακάτω γίνεται αναφορά σε μερικές από τις σημαντικότερες γεωμαγνητικές καταιγίδες των τελευταίων 500 ετών.

- 6-8 Μαρτίου 1582, Great Magnetic Storms.

Μία συντηρητική εκτίμηση της ελάχιστης τιμής του δείκτη Dst της μαγνητικής καταιγίδας στις 8 Μαρτίου 1582, δείχνει να είναι τουλάχιστον συγκρίσιμη με εκείνη της καταιγίδας στις 13-14 Μαρτίου 1989 (-589 nT) και της καταιγίδας στις 25-26 Σεπτεμβρίου 1909 (-595 nT) [14].

- Αρχές Σεπτεμβρίου 1859, Carrington event.

Το Carrington event έλαβε χώρα στις 1-2 Σεπτεμβρίου του 1859 κατά τη διάρκεια του 10^{ου} ηλιακού κύκλου (1855 - 1867). Μία εκτόξευση στεμματικής ύλης προσέκρουσε την μαγνητόσφαιρα της Γης και προκάλεσε τη μεγαλύτερη γεωμαγνητική καταιγίδα που έχει καταγραφεί μέχρι σήμερα [15].

- 31 Οκτωβρίου -1 Νοεμβρίου 1903, Ηλιακή καταιγίδα Οκτωβρίου- Νοεμβρίου 1903.

Μία καταιγίδα ακραίας έντασης κατά την οποία η ελάχιστη τιμή του γεωμαγνητικού δείκτη Dst -513 nT προήλθε από ένα ταχύτατο CME (μέση ταχύτητα 1500 km/s). Εμφανίστηκε κατά τη διάρκεια 14^{ου} ηλιακού κύκλου (1902-1913), ο οποίος θεωρείται σχετικά αδύναμος λόγω του μικρού αριθμού ηλιακών κηλίδων, οι οποίες προκλήθηκαν κατά τη διάρκειά του και είναι η πιο σημαντική καταιγίδα που έχει καταγραφεί σε περίοδο με ηλιακό ελάχιστο [16], [17].

- 25-26 Σεπτεμβρίου 1909, η γεωμαγνητική καταιγίδα του Σεπτεμβρίου 1909.

Ο δείκτης Dst υπολογίστηκε ότι έφτασε τα -595 nT, γεγονός το οποίο καθιστά την καταιγίδα συγκρίσιμη με εκείνη του Μαρτίου 1989 [18].

- 13–15 Μαΐου 1921, η γεωμαγνητική καταιγίδα του Μαΐου του 1921.

Η γεωμαγνητική καταιγίδα του Μαΐου του 1921 είχε διάρκεια 3 ημέρες (13-15 Μαΐου) και προκλήθηκε από τη σύγκρουση ενός πολύ ισχυρού CME με τη μαγνητόσφαιρα της Γης. Πρόκειται για την πιο ισχυρή καταιγίδα του 20^{ου} αιώνα, ωστόσο δεδομένου ότι συνέβη πριν από την εκτεταμένη διασύνδεση των

ηλεκτρικών συστημάτων και την εξάρτηση των υποδομών από τα ηλεκτρικά δίκτυα στον ανεπτυγμένο κόσμο, η επίδρασή της περιορίστηκε σημαντικά [19].

- 25-26 Ιανουαρίου 1938, Fatima Storm.

Η συγκεκριμένη γεωμαγνητική καταιγίδα έλαβε χώρα κατά τη διάρκεια του 17^{ου} ηλιακού κύκλου. Λόγω του γεγονότος ότι η ηλεκτροδότηση της Ευρώπης και της Βόρειας Αμερικής βρισκόταν ακόμη σε πρώιμα στάδια, οι επιπτώσεις της καταιγίδας δεν έγιναν τόσο αισθητές στην ανθρωπότητα. Οι ηλεκτρικές παρενέργειες ήταν ελάχιστες ενώ οι ραδιοφωνικές μεταδόσεις μικρού κύματος έκλεισαν για σχεδόν 12 ώρες στον Καναδά [20].

- Αρχές Αυγούστου 1972, οι ηλιακές καταιγίδες του Αυγούστου του 1972.

Οι ηλιακές καταιγίδες του Αυγούστου 1972 ήταν μία σειρά ηλιακών καταιγίδων με έντονα έως ακραία συμβάντα, τα οποία περιλάμβαναν ηλιακές εκλάμψεις και έλαβαν χώρα κατά τη διάρκεια του 20^{ου} ηλιακού κύκλου.

Οι καταιγίδες προκάλεσαν εκτεταμένες διαταραχές στα ηλεκτρικά και τηλεπικοινωνιακά δίκτυα του μεγαλύτερου τμήματος της Βόρειας Αμερικής, καθώς και δορυφορικές διακοπές. Στις 4 Αυγούστου 1972, οι καταιγίδες προκάλεσαν τυχαίες εκρήξεις πολλών ναυτικών ναρκών των ΗΠΑ κοντά στο Βόρειο Βιετνάμ. Ο χρόνος διέλευσης του CME από τον Ήλιο στη Γη είναι ο ταχύτερος που έχει καταγραφεί ποτέ [21].

- 13-14 Μαρτίου 1989, η γεωμαγνητική καταιγίδα του Μαρτίου του 1989.

Η γεωμαγνητική καταιγίδα του Μαρτίου του 1989 εμφανίστηκε ως μέρος μίας σειράς ηλιακών καταιγίδων, από τις αρχές έως τα μέσα του Μαρτίου του 1989. Η πιο αξιοσημείωτη ήταν αυτή της 13^{ης} Μαρτίου, η οποία προκάλεσε διακοπή διάρκειας 9 ωρών του συστήματος μετάδοσης ηλεκτρικής ενέργειας της Hydro-Québec στον Καναδά [22].

- 14 Ιουλίου 2000, Bastille Day Event ή Bastille Day Flare.

Το Bastille Day Event ή Bastille Day Flare πρόκειται για μία πολύ ισχυρή ηλιακή έκλαμψη, η οποία έλαβε χώρα στις 14 Ιουλίου του 2000 κατά τη διάρκεια του 23^{ου} ηλιακού κύκλου. Το Bastille Day Event παρατηρήθηκε από τα Voyager 1 και Voyager 2 και έτσι είναι το πιο απομακρυσμένο σημείο στο Ηλιακό Σύστημα από το οποίο έχει παρατηρηθεί ηλιακή καταιγίδα [23].

- Οκτώβριος 2003, Halloween solar storms.

Οι συγκεκριμένες ηλιακές καταιγίδες ήταν μία σειρά από ηλιακές εκλάμψεις και CMEs που έλαβαν χώρα από τα μέσα του Οκτωβρίου το 2003 έως τις αρχές του Νοεμβρίου του ίδιου έτους, με σημείο κορύφωσης τις 28 και 29 Οκτωβρίου. Αρκετά δορυφορικά συστήματα επηρεάστηκαν και στη Σουηδία σημειώθηκε διακοπή ρεύματος διάρκειας μίας ώρας [24].

2.2.2 Η τελευταία ηλιακή καταιγίδα μεγάλου μεγέθους

Η τελευταία ηλιακή καταιγίδα μεγάλου μεγέθους δημιουργήθηκε σε έκταση του Ήλιου μεγαλύτερη κατά 5 φορές από τη Γη, στις 23 Ιουλίου του 2012 και είναι η γρηγορότερη ηλιακή καταιγίδα που παρατηρήθηκε ποτέ. Στην επιφάνεια του Ήλιου σχηματίστηκαν κύματα, τα οποία ονομάστηκαν EIT waves αφού ανακαλύφθηκαν για πρώτη φορά με το υπεριώδες τηλεσκόπιο απεικόνισης (EIT).

Με βάση τα δεδομένα που συλλέχθηκαν, την έκρηξη στην επιφάνεια του Ήλιου ακολούθησαν 2 ξεχωριστές εκτοξεύσεις στεμματικής ύλης, οι οποίες απείχαν μεταξύ τους 10 με 15 λεπτά και η ταχύτητα με την οποία ταξίδευαν ήταν 1.800 με 2.200 μίλια ανά δευτερόλεπτο. Το μαγνητικό πεδίο μετρήθηκε στα 80 nT. Τα νότια μαγνητικά πεδία της Γης έμειναν σταθερά στα 40 nT για μερικές ώρες, γεγονός που μαζί με την ταχύτητα της καταιγίδας έκανε τους επιστήμονες να την ονομάσουν "ER" (Extremely Rare). Η ισχύς της έκρηξης ήταν συγκρίσιμη με το Carrington event του 1859, το οποίο προκάλεσε ζημιές σε ηλεκτρικό εξοπλισμό παγκοσμίως [25].

Εάν η ηλιακή καταιγίδα του 2012 είχε προσκρούσει στη Γη, είναι πολύ πιθανό ότι θα είχε προκαλέσει μεγάλες καταστροφές στα ηλεκτρικά δίκτυα σε παγκόσμια κλίμακα. Μελέτη που διεξήχθη το 2013 από τους Maynard και Smith, υπολόγισε ότι το οικονομικό κόστος των ζημιών στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής θα κυμαινόταν μεταξύ 600 δις και 2.6 τρις δολαρίων [26].

3 Επιδράσεις γεωμαγνητικών καταιγίδων σε ηλεκτρικά και τηλεπικοινωνιακά δίκτυα

3.1 Γενικά

Τα γεωηλεκτρικά πεδία, τα οποία προκαλούνται στο αγωγίμο εσωτερικό της Γης κατά τη διάρκεια μαγνητικών καταιγίδων, μπορούν να επηρεάσουν την ομαλή λειτουργία των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας. Συγκεκριμένα, η μαγνητική καταιγίδα της 13ης Μαρτίου 1989 δημιούργησε γεωηλεκτρικά πεδία τα οποία οδήγησαν στην κατάρρευση του συστήματος του ηλεκτρικού δικτύου της κρατικής εταιρείας Hydro-Québec. Η ίδια καταιγίδα προκάλεσε πολυάριθμα λειτουργικά προβλήματα στα δίκτυα ισχύος των ΗΠΑ και κατέστρεψε ένα μετασχηματιστή υψηλής τάσης σε ένα πυρηνικό σταθμό παραγωγής ενέργειας.

Στην επιφάνεια της Γης, το γεωμαγνητικό πεδίο $B(t, x, y)$ και το γεωηλεκτρικό πεδίο $E(t, x, y)$ είναι συναρτήσεις του χρόνου t και των γεωγραφικών συντεταγμένων του δισδιάστατου χώρου (x, y) , εφόσον μελετάμε την επιφάνεια της Γης η τρίτη διάσταση παραλείπεται. Για πρακτικούς λόγους, η ανάλυση των πεδίων μπορεί να πραγματοποιηθεί τόσο στο πεδίο του χρόνου όσο και στο πεδίο της συχνότητας, χρησιμοποιώντας τον μετασχηματισμό Fourier.

Οι συναρτήσεις των γεωμαγνητικών και των γεωηλεκτρικών πεδίων [27]:

$$F\{\mathbf{B}(t)\} = \mathbf{B}(f) \text{ και } F\{\mathbf{E}(t)\} = \mathbf{E}(f) \quad (1)$$

όπου f είναι η συχνότητα των ημιτονοειδών παραλλαγών.

Εστιάζουμε την προσοχή μας στα οριζόντια Καρτεσιανά στοιχεία των γεωμαγνητικών και των (επαγόμενων) γεωηλεκτρικών πεδίων,

$$\mathbf{B}_h(x,y) = [B_x, B_y] \text{ και } \mathbf{E}_h(x, y) = [E_x, E_y] \quad (2)$$

Στο εσωτερικό της Γης, η γεωμαγνητική και η γεωηλεκτρική διακύμανση στο εύρος συχνοτήτων, περιγράφεται από τους κλασικούς νόμους του σχεδόν στατικού ηλεκτρομαγνητισμού για ένα ηλεκτρικά αγωγίμο μέσο. Σε αυτήν την περίπτωση, η σχέση μεταξύ των γεωμαγνητικών και γεωηλεκτρικών πεδίων στην επιφάνεια της Γης μπορούν να συνοψιστούν σε μία γραμμική εξίσωση μεταφοράς

$$\mathbf{E}_h(f, x, y) = \frac{1}{\mu} \mathbf{Z}(f, x, y) \cdot \mathbf{B}_h(f, x, y) \quad (3)$$

όπου μ είναι η μαγνητική διαπερατότητα,

Z είναι η σύνθετη αντίσταση στο αγωγίμο εσωτερικό της Γης,

B_h είναι η συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου

Η σύνθετη αντίσταση Z εξαρτάται από τη συχνότητα και έχει πραγματικά και φανταστικά μέρη. Για ένα δεδομένο γεωμαγνητικό διάνυσμα B_h , η σύνθετη αντίσταση Z καθορίζει το πλάτος, την πόλωση και τη φάση του γεωηλεκτρικού πεδίου E . Η σύνθετη αντίσταση μετριέται σε μονάδες (Ω) ενώ η σύνθετη αντίσταση μεταφοράς Z/μ έχει μονάδες (V / km) / nT. Με αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier, η εξίσωση (3) μπορεί να διατυπωθεί ως συνέλιξη στο φάσμα του χρόνου :

$$E_h(t, x, y) = \frac{1}{\mu} (Z * B_h) (t, x, y). \quad (4)$$

3.2 Ηλιακά επαγόμενα ρεύματα (SIC)

Όπως προαναφέρθηκε, οι γεωμαγνητικές καταιγίδες μπορούν να προκαλέσουν λειτουργικά προβλήματα στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας και στις τηλεπικοινωνίες. Βασική αιτία των προβλημάτων αυτών αποτελεί το γεγονός ότι οι γεωμαγνητικές διαταραχές προκαλούν επαγόμενο δυναμικό στην επιφάνεια της γης, το οποίο με τη σειρά του παράγει ρεύματα σε γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας ή/και πληροφοριών [28].

Με την πρόοδο της τεχνολογίας, οι οπτικές αλλά και οι ασύρματες τηλεπικοινωνίες, αντικατέστησαν ένα μεγάλο μέρος του δικτύου των ενσύρματων τηλεπικοινωνιών με αποτέλεσμα τα συστήματα επικοινωνίας, τα οποία απειλούνται από γεωμαγνητικές καταιγίδες, να έχουν μειωθεί τα τελευταία χρόνια.

Στην περίπτωση όμως των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, επικρατεί τάση επέκτασης τόσο στις γραμμές τους όσο και στις διασυνδέσεις τους, στις περισσότερες γεωγραφικές περιοχές της Γης. Κατά αυτόν τον τρόπο, τα φαινόμενα τα οποία οφείλονται σε γεωμαγνητικές καταιγίδες μπορούν γίνουν εντονότερα.

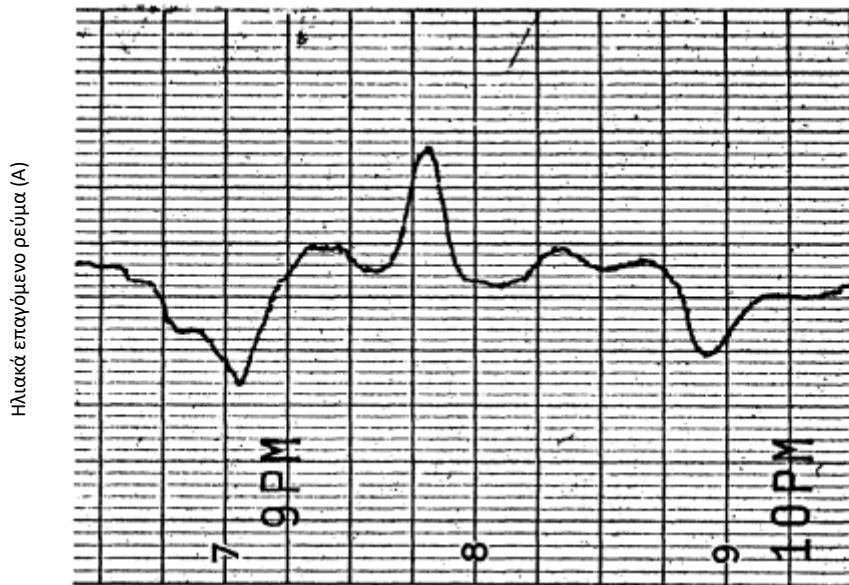
Τα ανεπιθύμητα ρεύματα τα οποία βρίσκονται στα συστήματα ισχύος, λόγω γεωμαγνητικών διαταραχών, ονομάζονται ηλιακά επαγόμενα ρεύματα (solar induced current ή SIC). Το SIC παίρνει τιμές από 5 έως 100 αμπέρ και η διάρκεια τους μπορεί να είναι μέχρι μερικά λεπτά.

Για τη σωστή μέτρηση του SIC σε συστήματα ισχύος χρειάζεται ένα DC αμπερόμετρο, το οποίο ονομάζεται συσκευή εγγραφής SIC, τοποθετημένο στον ουδέτερο αγωγό των καλωδίων των μετασχηματιστώ. Περίπου 30 ιδιωτικές εταιρείες κοινής ωφέλειας καθώς και πολλοί κυβερνητικοί οργανισμοί, αγόρασαν συσκευές εγγραφής SIC και τις εγκατέστησαν στα συστήματά τους. Η εικόνα 4 παρουσιάζει τις γεωγραφικές τοποθεσίες των συσκευών εγγραφής SIC στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής όπως καταγράφηκαν τον Ιούνιο του 1971 [28].



Εικόνα 4. Τοποθεσίες των συσκευών καταγραφής SIC στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής [28] το 1971.

Η κυματομορφή του SIC από τις συσκευές καταγραφής φαίνεται στο Σχ. 5. Οι συγκεκριμένες τιμές ρεύματος καταγράφηκαν στον ουδέτερο αγωγό ενός αυτομετασχηματιστή. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι, η τιμή του ρεύματος ξεπέρασε τα 40 A για περίπου τρία λεπτά ενώ επίσης ξεπέρασε τα 20 A για περίπου 7 λεπτά [28].



Σχήμα 5. Μέτρηση του SIC στο Peachbottom, Philadelphia Electric Company, Απρίλιος 1971. Η πλήρης κλίμακα είναι + 100 A από τη κεντρική κλίμακα [28].

3.3 Προβλήματα κορεσμού στους πυρήνες

Η παρουσία του SIC στις περιελίξεις των μετασχηματιστών, φέρει άμεσες συνέπειες στην ομαλή λειτουργία τους και επηρεάζει τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας με ανεπιθύμητους τρόπους. Το SIC, έχει θεμελιώδη περίοδο περίπου 6 έως 15 λεπτά και είναι quasi-dc (εναλλασσόμενα ρεύματα με πολύ μικρές συχνότητες, 0 έως 10 Hz) με αποτέλεσμα την ταυτόχρονη διέγερση στο AC και στο DC στους διασυνδεδεμένους μετασχηματιστές. Το μέγεθος του SIC μπορεί να είναι πολλές φορές μεγαλύτερο από το εναλλασσόμενο ρεύμα που διαρρέει τον μετασχηματιστή και με αυτόν τον τρόπο μπορεί να προκαλέσει κορεσμό μισού κύκλου στον πυρήνα.

Οι άμεσες συνέπειες του κορεσμού μισού κύκλου των μετασχηματιστών, μπορεί να είναι διακυμάνσεις στην τάση, ασυνήθιστη ροή άεργης ισχύος, δημιουργία αρμονικών, προβλήματα αναμετάδοσης και εσωτερική τοπική θέρμανση στους μετασχηματιστές. Υπάρχουν επίσης, τεκμηριωμένες περιπτώσεις κατά τη διάρκεια σοβαρών γεωμαγνητικών καταιγίδων, κατά τις οποίες έχει προκληθεί μεταβολή της τάσης άνω του 10%, υπερβολική ροή άεργης ισχύος καθώς και ανεπιθύμητες διακοπές τροφοδοσίας από τα ρελέ των μετασχηματιστών [28].

Τα αποτελέσματα θεωρητικών μελετών και οι εμπειρίες των εταιρειών ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διάρκεια του πιο πρόσφατου κύκλου γεωμαγνητικής δραστηριότητας, δείχνουν ότι οι διακυμάνσεις στην τάση του συστήματος και η ασυνήθιστη ροή άεργης ισχύος, αποτελούν σοβαρά προβλήματα μόνο στην περίπτωση εξαιρετικά σοβαρής γεωμαγνητικής καταιγίδας σε εκτεταμένη γεωγραφική περιοχή. Καταιγίδες παρόμοιας έντασης εμφανίστηκαν το 1940 και το 1958.

Ένα από τα προβλήματα στα ρελέ τα οποία έχουν εντοπιστεί, αποτελεί ο κορεσμός των μετασχηματιστών ρεύματος (Current transformer - CT), ο οποίος απευαισθητοποιεί τα ρελέ ή δυσλειτουργίες. Επίσης, μπορεί να προκληθεί κορεσμός σε ένα μετασχηματιστή ισχύος, ο οποίος μπορεί να προκαλέσει μόνιμο σφάλμα σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Στη συνέχεια θα συζητηθεί ένα πρόβλημα μεγαλύτερης ανησυχίας το οποίο είναι η εσωτερική τοπική θέρμανση σε μετασχηματιστές λόγω SIC [28].

3.4 Εσωτερική τοπική θέρμανση – Internal Localized Heating (ILH)

Στους μετασχηματιστές, είναι συχνό το πρόβλημα της εσωτερικής τοπικής θέρμανσης (Internal localized heating), η οποία οφείλεται σε ηλιακά επαγόμενο ρεύμα. Η παρουσία του SIC προκαλεί την ταυτόχρονη διέγερση AC και DC σε ένα ενεργό μετασχηματιστή, με αποτέλεσμα ο πυρήνας να φτάνει σε κορεσμό μισού κύκλου. Εάν ο βαθμός κορεσμού μισού κύκλου είναι επαρκής, ο πυρήνας από χάλυβα γίνεται κορεσμένος και η ροή αναγκάζεται να ακολουθήσει μονοπάτια μέσω αέρα και δομικών χαλύβδινων μελών [28].

Βάσει όσων προαναφέρθηκαν, υπάρχει η πιθανότητα υπερβολικής θέρμανσης στο υλικό του πυρήνα και στα δομικά στοιχεία από αστάλι. Υπάρχει, επίσης, η πιθανότητα πρόσθετης θέρμανσης από αυξημένη απώλεια στους αγωγούς περιέλιξης, ως αποτέλεσμα, τόσο του αυξημένου επαγόμενου ρεύματος, όσο και των υψηλότερων αρμονικών του.

Εάν υπάρχει υπερβολική εσωτερική τοπική θέρμανση λόγω SIC με οποιοδήποτε από τα αναφερόμενα μέσα, τίθεται το ερώτημα, ως προς το βαθμό της θερμικής αποδόμησης της μόνωση των πύρινων ελασμάτων (οξειδίο ή βερνίκι) ή οποιασδήποτε άλλης μόνωσης δίπλα στο δομικό χάλυβα. Η θερμική αποδόμηση αυτού του τύπου θα συνέβαλε τα μέγιστα στη συντόμηση της διάρκειας ζωής της μόνωσης. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την ILH είναι ο σχεδιασμός του πυρήνα και το μαγνητισμένο ρεύμα, για μία δεδομένη ποσότητα ρεύματος στο dc.

Τα παραπάνω, καθιστούν αναγκαία την ύπαρξη ενός ευρύτερου φάσματος μετασχηματιστών με διαφορετικό σχεδιασμό και βαθμολογίες, ώστε η απόκριση στο SIC να γίνει όσο το δυνατόν καλύτερη. Οι μόνες διαθέσιμες οδηγίες για τον υπολογισμό του SIC έναντι χρονικών ορίων για μετασχηματιστές δίνονται από τον ακόλουθο τύπο [28]:

$$I_{eq} = I_{ac} + K I_{dc}, \quad (5)$$

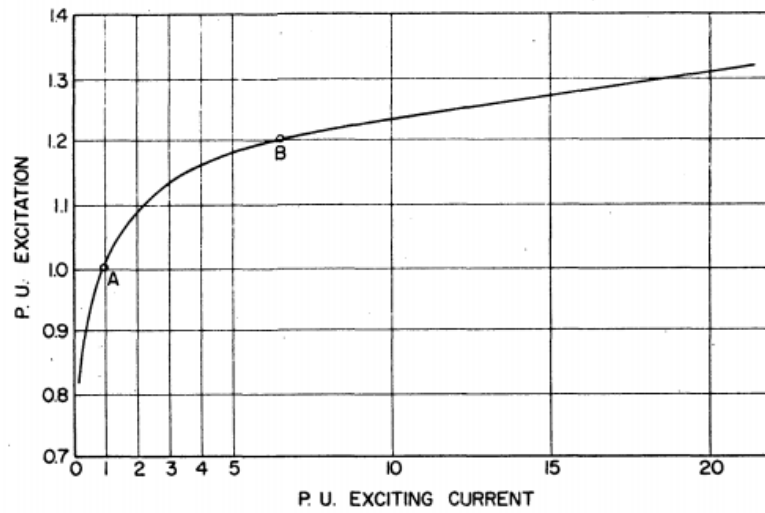
Όπου

I_{eq} είναι ένα ισοδύναμο ρεύμα μαγνητισμού

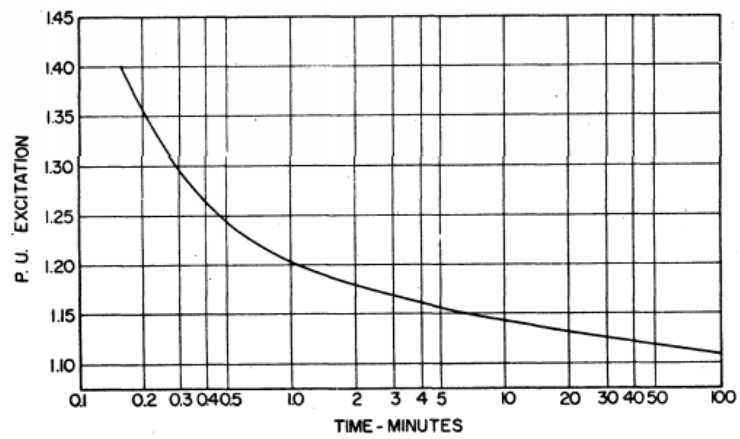
I_{ac} είναι ένα μετρημένο ρεύμα μαγνητισμού

I_{dc} είναι η dc συνιστώσα του ρεύματος ανά φάση

$K = 2.8$



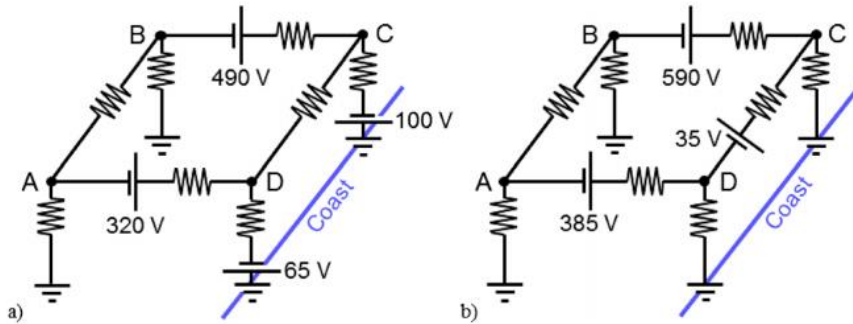
Σχήμα 6. Καμπύλη κορεσμού εναλλασσόμενου ρεύματος [28].



Σχήμα 7. Βραχυπρόθεσμα όρια υπερδιέγερσης των μετασχηματιστών ισχύος [28].

3.5 Υπολογισμός του ηλιακά επαγόμενου ρεύματος (SIC)

Για να υπολογίσουμε σωστά το SIC, θα πρέπει πρώτα να ορίσουμε το θεωρητικό μοντέλου δικτύου στο οποίο θα γίνουν οι υπολογισμοί.



Σχήμα 8. Γεωμαγνητική επαγωγή σε τετραγωνικό δίκτυο κοντά σε ακτή. Τα ηλεκτρικά πεδία αναπαρίστανται (a) από ένα συνδυασμό πηγών τάσεων στις γραμμές μετάδοσης και στη γείωση και (b) από πηγές τάσης στις γραμμές μετάδοσης [29].

3.5.1 Μοντελοποίηση του δικτύου

Το μοντέλο δικτύου, στο οποίο έγινε η ανάλυση, αποτελείται από τέσσερις υποσταθμούς και οι πηγές τάσεις υπολογίζονται βάσει του ηλεκτρικού πεδίου σε κάθε γραμμή μεταφοράς. Ο κάθε υποσταθμός γειώνεται στο έδαφος με αντίσταση 0.5Ω και συνδέεται σε μία γραμμή μετάδοσης μήκους 100 km με αντίσταση 5Ω η κάθε μία, όπως φαίνεται στο Σχ. 8a [30].

Ωστόσο, λόγω της εγγύτητας του δικτύου στην ακτή, υπάρχει ένα επιπλέον ηλεκτρικό πεδίο, το οποίο υπολογίζεται ότι αυξάνει το συνολικό ηλεκτρικό πεδίο κατά 20% . Αυτήν την αύξηση, μπορούμε να την αναπαριστήσουμε με πηγές τάσης των 100 V και 65 V αντίστοιχα, στους υποσταθμούς δίπλα στην ακτή (C, D) όπως φαίνεται στο Σχ. 8a ή προσθέτοντας τις τιμές τους στις πηγές των γραμμών μεταφοράς, όπως φαίνεται στο Σχ. 8b.

Παράλληλα, το σύστημα ισχύος αποτελείται από τις γραμμές μεταφοράς και τις περιελίξεις των μετασχηματιστών, για κάθε φάση του τριφασικού συστήματος, οι οποίες παρέχουν την ίδια ροή SIC. Κατά συνέπεια, οι υπολογισμοί μπορούν να γίνουν στην μία από τις τρεις φάσεις του τριφασικού, καθώς θα ισχύουν και για τις άλλες δύο.

Χρησιμοποιώντας ένα δίκτυο αντιστάσεων και εφαρμόζοντας τον 2^ο νόμο του Kirchhoff για τον βρόχο (ABCD) προκύπτει ένα σύστημα εξισώσεων υπό την μορφή πινάκων, το οποίο όταν επιλυθεί μπορεί να δώσει τις τιμές των ρευμάτων σε κάθε βρόχο. Ωστόσο, η μέθοδος αυτή δεν επαρκεί για μεγάλα δίκτυα και θα πρέπει το σύστημα να διατυπωθεί ως ένα δίκτυο σύνθετων αγωγιμοτήτων το οποίο θα αναλυθεί στη συνέχεια.

3.5.2 Ανάλυση του δικτύου

Έχοντας ορίσει το μοντέλο δικτύου πάνω στο οποίο θα γίνει η ανάλυση και ο υπολογισμός του SIC, θα πρέπει να κάνουμε μερικές ακόμα παραδοχές. Για να υπολογίσουμε το SIC σε ένα σύστημα ισχύος, χρησιμοποιώντας ένα δίκτυο σύνθετων αγωγιμοτήτων, κάθε αντίσταση σε κάθε κλάδο θα πρέπει να αντικατασταθεί με την ισοδύναμη τιμή της αγωγιμότητας της. Ταυτόχρονα, κάθε πηγή τάσης θα πρέπει να αντικατασταθεί με την ισοδύναμη πηγή ρεύματος, $j = e/r_L$, παράλληλα με τη σύνθετη αγωγιμότητα της γραμμής μετάδοσης $y_L = 1/r_L$, όπου r_L είναι η αντίσταση της γραμμής μετάδοσης [30].

Σύμφωνα με τον νόμο του Ohm:

$$i_k = v_k y_k \quad (6)$$

Έπειτα, χρησιμοποιούμε τον 1^ο νόμο του Kirchhoff για κάθε κόμβο και προκύπτει ένα σετ εξισώσεων για τα ρεύματα και τις τάσεις στους κόμβους.

$$J_k = i_k + v_k \sum_{n=1}^N y_{nk} - \sum_{n=1}^N v_n y_{nk} \quad (7)$$

Όπου,

V_k οι τάσεις στους κόμβους

i_k τα ρεύματα στους κόμβους

y_k η σύνθετη αγωγιμότητα της κάθε γραμμής

Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο NAM (nodal admittance matrix), οι εξισώσεις (6) και (7) συνδυάζονται και προκύπτουν εξισώσεις που περιλαμβάνουν τις τάσεις στους κόμβους. Στη συνέχεια, οι τάσεις στους κόμβους υπολογίζονται, παίρνοντας τον αντίστροφο πίνακα των σύνθετων αγωγιμοτήτων και πολλαπλασιάζοντας με τα ρεύματα στους κόμβους.

$$[V] = [Y]^{-1}[J] \quad (8)$$

Όπου, $[J]$ είναι το διάνυσμα πηγής του ρεύματος, το οποίο υπολογίζεται ως το άθροισμα των ρευμάτων που εισέρχονται στον κόμβο

$$J_k = \sum_{n=1}^N j_{nk} \quad (9)$$

Και $[Y]$ είναι ο πίνακας σύνθετων αγωγιμοτήτων, στον οποίο τα στοιχεία που βρίσκονται στην κύρια διαγώνιο είναι τα αθροίσματα όλων των σύνθετων αγωγιμοτήτων όλων των

διαδρομών που φθάνουν στον κόμβο k ενώ τα υπόλοιπα στοιχεία είναι οι αρνητικές σύνθετες αγωγιμότητες των συνδέσεων μεταξύ των κόμβων k και n . Προκύπτει:

$$Y_{kk} = y_k + \sum_{n=1}^N y_{nk} \quad n \neq k, y_{nk} = -y_{kn} \quad (10)$$

Οι τάσεις στους κόμβους που υπολογίστηκαν μπορούν να αντικατασταθούν στην εξίσωση (6) για να δώσουν τα ρεύματα στη γείωση από κάθε κόμβο.

Η μέθοδος Lehtinen-Pirjola (LP) συνδυάζει τις εξισώσεις (6) και (7) για να δώσει εξισώσεις οι οποίες περιλαμβάνουν τα ρεύματα στη γείωση και επιλύονται με αντιστροφή του πίνακα.

$$[I^e] = ([1] + [Y^n][Z^e])^{-1}[J^e] \quad (11)$$

Όπου, $[1]$ είναι ο μοναδιαίος πίνακας, ενώ ο πίνακας σύνθετων αγωγιμοτήτων $[Y^n]$ δίνεται από τη:

$$y_{kk}^n = \sum_{n=1}^N y_{nk} \quad n \neq k, y_{kn}^n = -y_{kn}^n \quad (12)$$

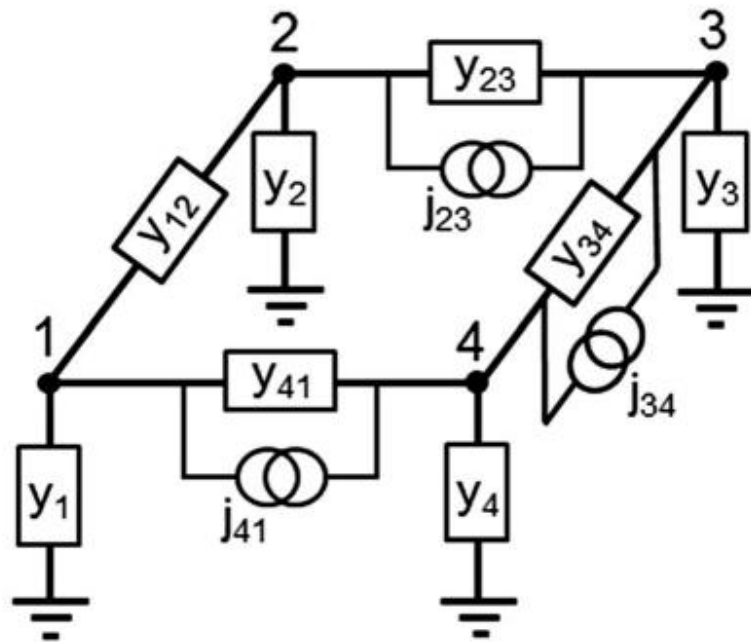
Και Z^e είναι ο πίνακας σύνθετης αντίστασης μεταξύ εδάφους και κόμβων

$$v_k = \sum_{n=1}^N Z_{kn}^e i_n \quad (13)$$

Οι τάσεις στους κόμβους μπορούν, επίσης, να προκύψουν και από την σχέση (6), χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Lehtinen-Pirjola και τα ρεύματα που λαμβάνονται στη γείωση. Και οι δύο προσεγγίσεις είναι μαθηματικά ισοδύναμες [31].

3.5.3 Αναλυτική εφαρμογή του μοντέλου για υπολογισμό του ηλιακά επαγόμενου ρεύματος (SIC)

Λαμβάνοντας υπόψη όσα αναλύθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους, ο θεωρητικός υπολογισμός του SIC στο δικτύου μπορεί να βασιστεί στο Σχ. 3.4b και κατ' επέκταση μπορούμε να το μετατρέψουμε στο παρακάτω δίκτυο σύνθετων αγωγιμοτήτων, το οποίο απεικονίζεται στο Σχ. 9 [30].



Σχήμα 9. Απλό μονοφασικό κύκλωμα του δικτύου ισχύος του Σχ. 3.4b με ισοδύναμες πηγές ρεύματος j και σύνθετη αγωγιμότητα y [30].

Σε κάθε κόμβο του δικτύου του Σχ. 8 εφαρμόζουμε τον 1^ο νόμο του Kirchhoff, ο οποίος ορίζει ότι το αλγεβρικό άθροισμα των ρευμάτων που εισέρχονται σε οποιονδήποτε κόμβο ισούται με το μηδέν. Με άλλα λόγια, το ρεύμα το οποίο εισέρχεται στις γραμμές μετάδοσης είναι ίσο με το ρεύμα που διαρρέει προς το έδαφος και προκύπτει:

$$\begin{aligned}
 i_{41} - i_{12} &= i_1 \\
 i_{12} - i_{23} &= i_2 \\
 i_{23} - i_{34} &= i_3 \\
 i_{34} - i_{41} &= i_4
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

Η πηγή ρεύματος, η διαφορά της τάσης μεταξύ των κόμβων στα άκρα της γραμμής και η σύνθετη αγωγιμότητα της γραμμής καθορίζουν το ρεύμα που τη διαρρέει.

$$i_{nk} = j_{nk} + (v_n - v_k) y_{nk} \tag{15}$$

Ισχύει ότι $i_{nk} = -i_{kn}$. Παράλληλα, χρησιμοποιώντας τον νόμο του Ohm, το ρεύμα που διαρρέει προς το έδαφος από κάθε κόμβο, μπορεί να γραφεί ως :

$$i_k = v_k y_k \tag{16}$$

Αντικαθιστώντας τα ρεύματα στην εξίσωση (14), παίρνουμε εξισώσεις μόνο με τις τιμές των τάσεων κάθε κόμβου ως άγνωστες.

$$\begin{aligned}
 j_{41} + y_{41}(v_4 - v_1) - j_{12} - y_{12}(v_1 - v_2) &= y_1 v_1 \\
 j_{12} + y_{12}(v_1 - v_2) - j_{23} - y_{23}(v_2 - v_3) &= y_2 v_2 \\
 j_{23} + y_{23}(v_2 - v_3) - j_{34} - y_{34}(v_3 - v_4) &= y_3 v_3 \\
 j_{34} + y_{34}(v_3 - v_4) - j_{41} - y_{41}(v_4 - v_1) &= y_4 v_4
 \end{aligned} \tag{17}$$

Αναδιατάσσοντας το σύστημα εξισώσεων (17):

$$\begin{aligned}
 j_{41} - j_{12} &= -y_{41}v_4 + (y_{41} + y_1 + y_{12})v_1 - y_{12}v_2 \\
 j_{12} - j_{23} &= -y_{12}v_1 + (y_{12} + y_2 + y_{23})v_2 - y_{23}v_3 \\
 j_{23} - j_{34} &= -y_{23}v_2 + (y_{23} + y_3 + y_{34})v_3 - y_{34}v_4 \\
 j_{34} - j_{41} &= -y_{34}v_3 + (y_{34} + y_4 + y_{41})v_4 - y_{41}v_1
 \end{aligned} \tag{18}$$

Οι πηγές ρεύματος παράλληλα στη γραμμή από τον κόμβο k ως τον κόμβο n , μπορούν να αναπαρασταθούν από πηγές ρεύματος στους κόμβους σε κάθε άκρο της γραμμής. Στο ένα άκρο το ρεύμα θα ρέει προς τον κόμβο n , ενώ στον άλλο το ρεύμα θα ρέει από τον κόμβο k .

Τα ρεύματα, στο αριστερό μέλος της εξίσωσης (18), αντιπροσωπεύουν το σύνολο των ισοδύναμων ρευμάτων που κατευθύνονται προς κάθε κόμβο, το οποίο το ονομάζουμε j_k .

Ως εκ τούτου, οι εξισώσεις παίρνουν τη μορφή:

$$\begin{aligned}
 j_1 &= -y_{41}v_4 + (y_{41} + y_1 + y_{12})v_1 - y_{12}v_2 \\
 j_2 &= -y_{12}v_1 + (y_{12} + y_2 + y_{23})v_2 - y_{23}v_3 \\
 j_3 &= -y_{23}v_2 + (y_{23} + y_3 + y_{34})v_3 - y_{34}v_4 \\
 j_4 &= -y_{34}v_3 + (y_{34} + y_4 + y_{41})v_4 - y_{41}v_1
 \end{aligned} \tag{19}$$

Οι εξισώσεις της (19) σε μορφή πινάκων:

$$\begin{bmatrix} j_1 \\ j_2 \\ j_3 \\ j_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{41} + y_1 + y_{12} & -y_{12} & 0 & -y_{41} \\ -y_{12} & y_{12} + y_2 + y_{23} & -y_{23} & 0 \\ 0 & -y_{23} & y_{23} + y_2 + y_{34} & y_{34} \\ -y_{41} & 0 & -y_{34} & y_{34} + y_4 + y_{41} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{bmatrix} \quad (20)$$

Στη συνέχεια, με αντιστροφή πίνακα, επιλύουμε το σύστημα εξισώσεων (20) και βρίσκουμε τις τιμές των τάσεων στους κόμβους. Έπειτα, αντικαθιστούμε τις τιμές που βρήκαμε στην εξίσωση (15), ώστε να βρούμε τα ρεύματα στις γραμμές. Χρησιμοποιώντας την εξίσωση (16), τις πλέον γνωστές τιμές των ρευμάτων στις γραμμές αλλά και τις υπάρχουσες αγωγιμότητες, βρίσκουμε τα ρεύματα που ρέουν προς το έδαφος.

3.6 Αποτελέσματα θεωρητικών υπολογισμών

Με βάση όσα αναλύθηκαν παραπάνω, το παραγόμενο ηλιακά επαγόμενο ρεύμα, το οποίο διαρρέει τα ηλεκτρικά δίκτυα, υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας το μοντέλο του ισοδύναμου τετράγωνου δικτύου δίπλα σε ακτή που φαίνεται στα σχήματα 8a και 8b και παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 2: Παραγόμενο SIC από ηλεκτρικά πεδία σε A [30].

Location	SIC	SIC
A to ground	-67.0	-67.0
B to ground	-95.5	-95.5
C to ground	101.3	101.3
D to ground	61.2	61.2
A to B	2.8	2.8
A to D	64.2	64.2
B to C	98.3	98.3
C to D	-3.0	-3.0

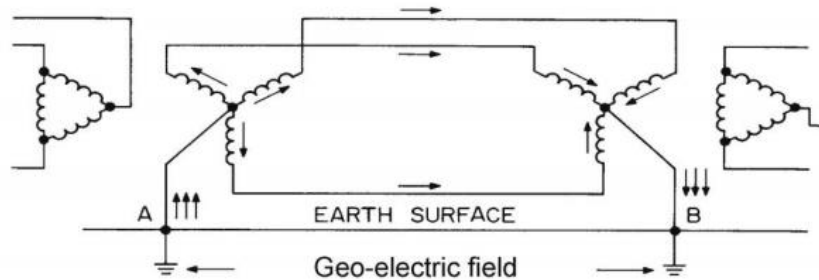
Από τον πίνακα 2 γίνεται εμφανές ότι τα δύο μοντέλα δικτύων είναι ισοδύναμα αφού μπορούμε πολύ εύκολα να παρατηρήσουμε ότι το ρεύμα που μετρήθηκε σε κάθε βρόχο του ενός δικτύου είναι ίσο με το αντίστοιχο ρεύμα του άλλου.

4 Επιπτώσεις, περιορισμός και αντιμετώπιση του ηλιακά επαγόμενου ρεύματος (SIC)

4.1 Επιπτώσεις στα επίπεδα ρεύματος των ηλεκτρικών δικτύων

Με την πάροδο πολλών ετών, μέσα από διαδικασίες υπολογισμών, έγινε εμφανές ότι μεγαλύτερα σε μέγεθος ηλιακά επαγόμενα ρεύματα, παρατηρούνται σε δίκτυα με τις υψηλότερες τάσεις [32]. Τα δίκτυα των Hydro-Quebec στον Καναδά και της American Electric Power στις ΗΠΑ, διαθέτουν δίκτυα εναλλασσόμενου ρεύματος υψηλής τάσης της τάξης των 765 kV, στα οποία παρατηρούνται πολύ μεγάλα ρεύματα κατά τη πάροδο γεωμαγνητικών καταιγίδων. Αντίθετα, δίκτυα συνεχούς ρεύματος υψηλής τάσης (HVDC) είναι άτρωτα σε ανεπιθύμητα ρεύματα γιατί οι κλάδοι ανόρθωσης περιορίζουν το συνεχές ρεύμα.

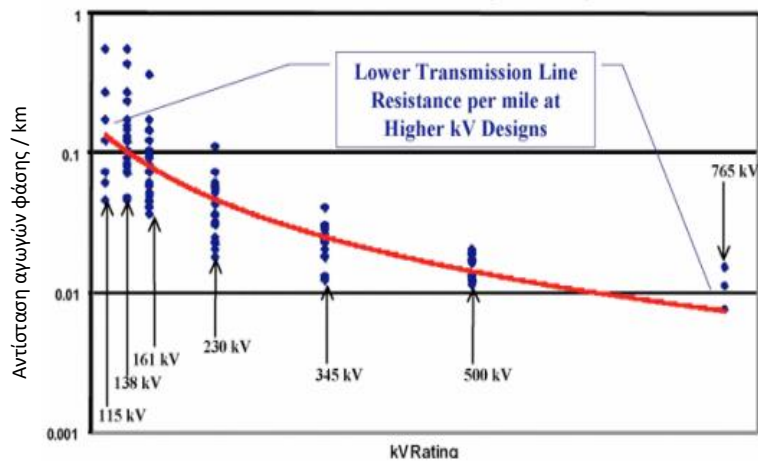
Το Σχ. 10 απεικονίζει ένα πολύ απλό δίκτυο που αποτελείται από ένα τριφασικό κύκλωμα με μήκος 100 km και ένα υποθετικό επαγόμενο ηλεκτρικό πεδίο κορυφής 1 V / km.



Σχήμα 10. Απλό δίκτυο γραμμής μετάδοσης υψηλής τάσης 3 φάσεων, με τυπικό σχέδιο γείωσης [32].

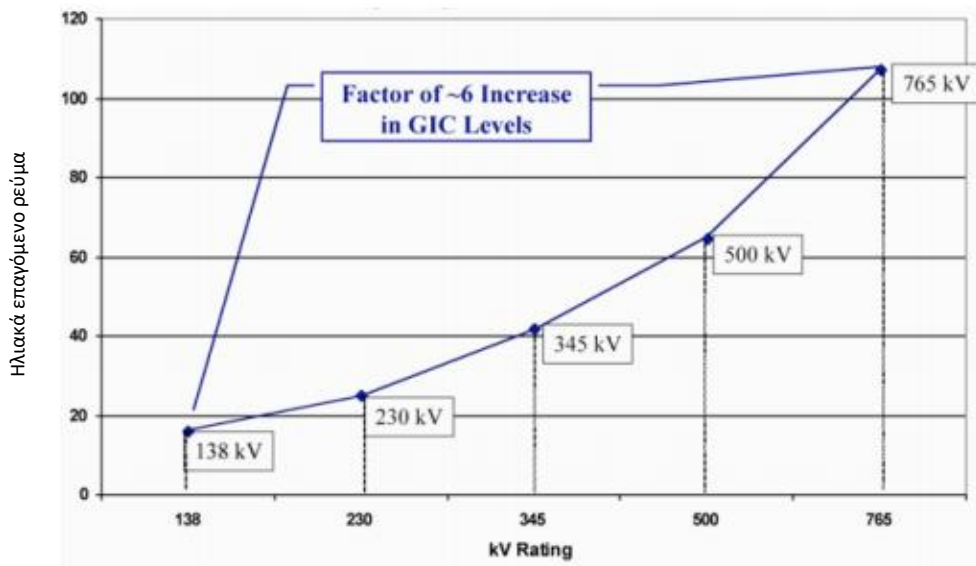
Όπως φαίνεται στο Σχ. 10, το ρεύμα που ρέει στο δίκτυο εξαρτάται από το γεωηλεκτρικό πεδίο που προκαλείται μεταξύ των ουδέτερων σημείων της γείωσης των μετασχηματιστών και της αντίστασης του δικτύου. Στις αρκετά μεγάλες σε μήκος γραμμές, οι αντιστάσεις γραμμής και γείωσης είναι πολύ μεγαλύτερες από την αντίσταση του μετασχηματιστή, η οποία μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα. Το Σχ. 11 απεικονίζει τις τιμές των αντιστάσεων γραμμής ως συνάρτηση της τάσης λειτουργίας της γραμμής μετάδοσης [32].

Μπορούμε με βεβαιότητα να συμπεράνουμε ότι, όσο αυξάνεται η τάση λειτουργίας της γραμμής, η αντίσταση μειώνεται. Συγκεκριμένα, για τάσεις γραμμών της τάξης των 120 – 150 kV, η αντίσταση γραμμής υπολογίστηκε σε περίπου 0.1 Ω, ενώ για γραμμές της τάξης των 600 kV η αντίσταση γραμμής υπολογίστηκε στα 0.01 Ω.



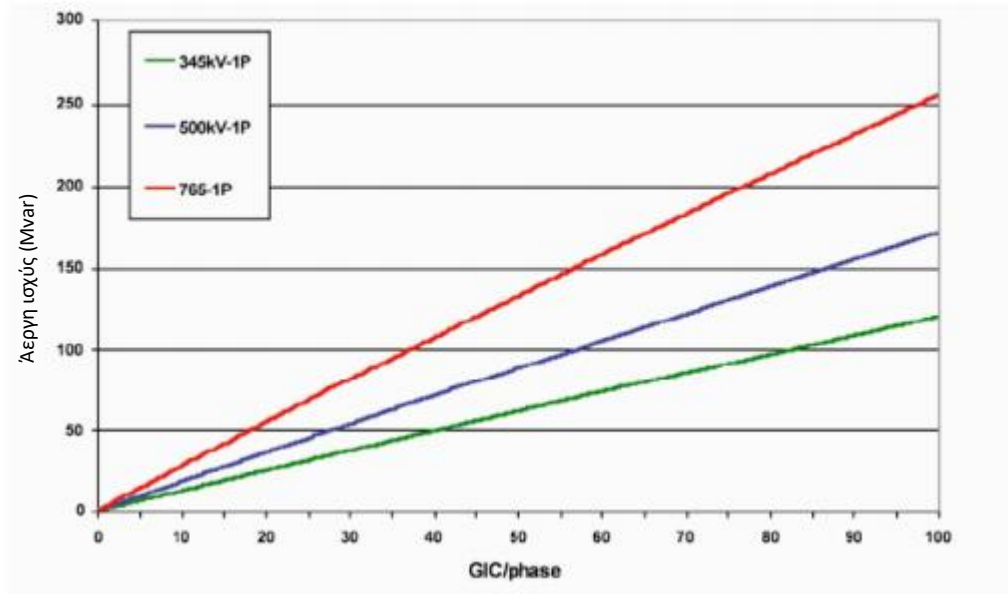
Σχήμα 11. Η αντίσταση γραμμής των αγωγών μεταφοράς σε Ω σε μία γραμμή μεταφοράς μήκους 100 χλμ. ως συνάρτηση της τάσης λειτουργίας της [32].

Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα γραμμής (φαίνεται η προσαρμογή καμπύλης) και προσθέτοντας άλλες μικρότερες αντιστάσεις για τις περιελίξεις του μετασχηματιστή και τη γείωση, μπορεί κανείς να υπολογίσει το ρεύμα που ρέει κατά μέσο όρο ως συνάρτηση της τάσης δικτύου μετάδοσης. Αυτό φαίνεται στο Σχ. 12.



Σχήμα 12. Μέσο επίπεδο SIC σε Amp/phase που προκαλείται από 1 V/km ηλεκτρικό πεδίο ηλεκτρομαγνητικής καταιγίδας σε μία γραμμή μεταφοράς μήκους 100 χλμ. για συγκεκριμένη αντίσταση κυκλώματος [32].

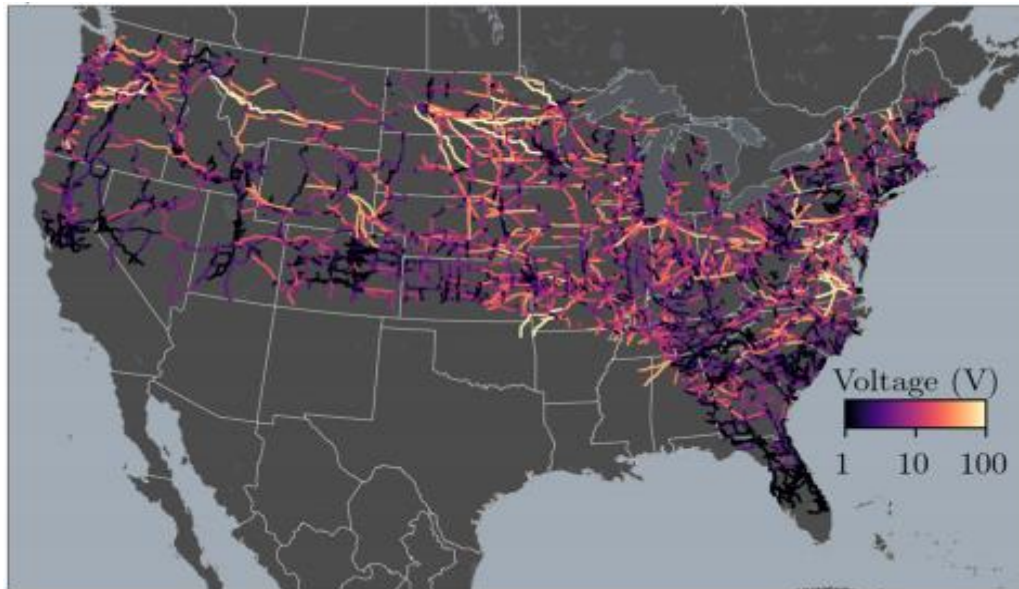
Όπως υποδεικνύεται στο Σχ. 11, η ποσότητα του ηλιακά επαγόμενου ρεύματος αυξήθηκε περίπου κατά 6 φορές, λόγω της αύξησης του επιπέδου της τάσης λειτουργίας. Είναι σαφές ότι όταν τα επίπεδα τάσης ξεπεράσουν το 1 MV, η κατάσταση θα είναι ακόμη χειρότερη. Όπως φαίνεται στο Σχ. 4-4, για δεδομένη ποσότητα ρεύματος SIC, οι μετασχηματιστές τάσης παράγουν υψηλότερο επίπεδο άεργης ισχύος. Αυτή η άεργη ισχύς είναι ο παράγοντας ο οποίος μπορεί να οδηγήσει σε πολύ γρήγορες διακοπές ρεύματος του συστήματος τροφοδοσίας [32].



Σχήμα 13. Σχέση μεταξύ του SIC και της ζήτησης άεργου ισχύος σε MVar για 3 μονοφασικούς μετασχηματιστές [32].

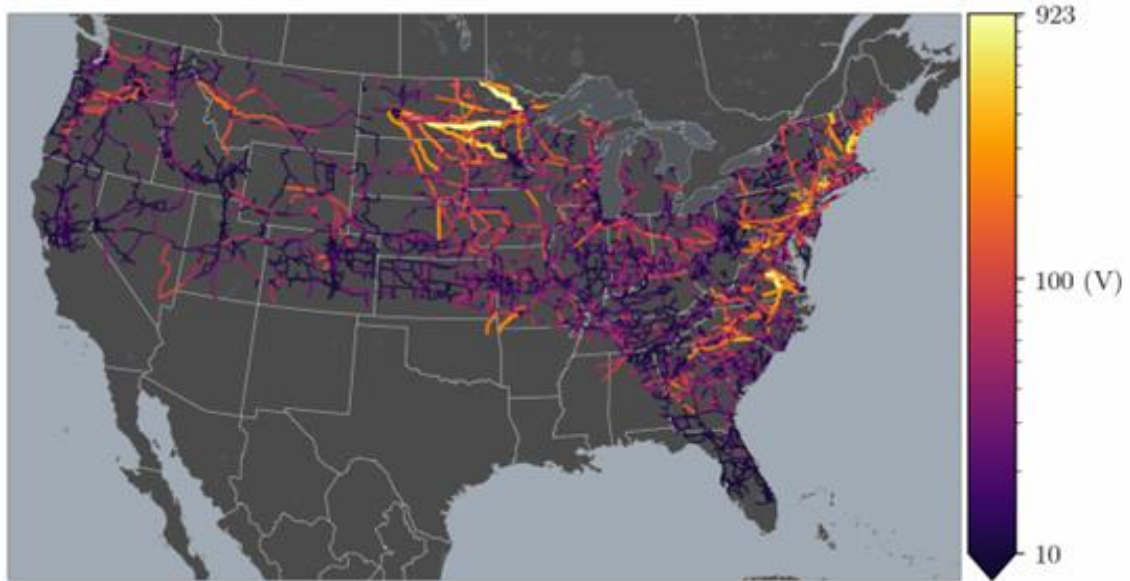
4.2 Επιπτώσεις στα επίπεδα τάσης των ηλεκτρικών δικτύων

Μία φορά ανά 100 χρόνια δημιουργείται ένας χάρτης επικινδυνότητας για το αμερικάνικο δίκτυο υψηλής τάσης, χρησιμοποιώντας τα δεδομένα των τελευταίων 31 ετών. Τα δεδομένα αυτά, αντλήθηκαν από 24 σημεία παρατήρησης, 1079 σημεία έρευνας και 17,258 γραμμές μετάδοσης [33].



Εικόνα 5. Στιγμιότυπο από την γεωμαγνητική καταιγίδα του Μαρτίου του 1989 [33].

Η εικόνα 5, λαμβάνοντας υπόψη τη χωρική κατανομή των γεωηλεκτρικών πεδίων, δείχνει την επαγόμενη τάση στις γραμμές μεταφοράς, η οποία είναι ανάλογη του μήκους της γραμμής μεταφοράς. Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η τάση, η οποία επάγεται στις γραμμές μεταφοράς του δικτύου υψηλής τάσης, κυμαίνεται από $< 1V$ έως $100 V$ και επομένως δεν αποτελεί πρόβλημα σε μία γραμμή υψηλής τάσης γιατί η τιμή είναι σχετικά μικρή.



Εικόνα 6. Χάρτης ανά 100 έτη μέγιστης τάσης στις γραμμές μετάδοσης [33].

Η μέγιστη τάση στις γραμμές μεταφοράς παρουσιάζονται στον χάρτη της εικόνας 2. Μπορούμε να διακρίνουμε ότι η τάση των γραμμών παίρνει τιμές από <1 V έως 923V. Αξίζει να σημειωθεί ότι η εικόνα 6 δεν είναι μία επαναπροβολή του χάρτη της εικόνας 5, αλλά προκύπτει από τα δεδομένα των τελευταίων 100 ετών, τα οποία προήρθαν από στατιστική ανάλυση και εκτιμήσεις των δεδομένων των 31 τελευταίων ετών.

Ο παραπάνω χάρτης, εξαρτάται άμεσα από την τοπολογία των γραμμών μεταφοράς, για το λόγο αυτό, σε περίπτωση προσθήκης ή αλλαγής των γραμμών, ο χάρτης θα πρέπει να ανανεωθεί κατάλληλα.

4.3 Πρόβλεψη γεωμαγνητικών φαινομένων

Είναι ιδιαίτερα σημαντικό, να γνωρίζουμε πότε και που, μία γεωμαγνητική καταιγίδα θα λάβει χώρα ώστε να λάβουμε όσο το δυνατόν καλύτερα μέτρα αντιμετώπισης όσο αφορά τα ηλεκτρικά και τηλεπικοινωνιακά δίκτυα.

Οι προβλέψεις γεωμαγνητικών φαινομένων, τα οποία μπορούν να επηρεάσουν τα ηλεκτρικά συστήματα και τις τηλεπικοινωνίες στη Γη, μπορούν να χωριστούν στις παρακάτω τρεις (3) κατηγορίες.

- I. Μακράς διάρκειας (Long lead times)
- II. Μεσαίας διάρκειας (Medium lead times)
- III. Βραχυπρόθεσμες (Short lead times)

Στην πρώτη κατηγορία, επικρατεί περιορισμένη ικανότητα πρόβλεψης και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, βασιζόμαστε σε φαινόμενα, όπως CME κ.α. τα οποία έχουν σχετικά αργή εξέλιξη. Αυτή η αργή εξέλιξη, μπορεί να δώσει προβάδισμα 8-10 ημερών ώστε να λάβουμε τα κατάλληλα μέτρα προστασίας.

Στις προβλέψεις μεσαίας διάρκειας, αρχικά, παρατηρούμε να σχηματίζεται στον Ήλιο ένα CME. Παρατηρώντας το, μπορούμε να διεξάγουμε συμπεράσματα για την ταχύτητα, τη μορφολογία και την κατεύθυνσή του και να συμπεράνουμε αν έχει πορεία προς τη Γη. Η διάρκεια μετάδοσης ενός CME από τον Ήλιο στη Γη διαρκεί περίπου από 36 ώρες έως 2 ημέρες.

Βραχυπρόθεσμες προβλέψεις υφίστανται χάρη στην ύπαρξη του διαστημοπλοίου ACE της NASA. Το Ace περιοδικά συλλέγει δεδομένα που αφορούν παραμέτρους του ηλιακού ανέμου, τα οποία αποστέλλονται στη Γη, επεξεργάζονται και είναι διαθέσιμα σε πραγματικό χρόνο. Φαινόμενα, τα οποία παρατηρεί το διαστημόπλοιο Ace και περνάνε κοντά στην τοποθεσία του, όπως CME's, κάνουν περίπου 17 έως 25 λεπτά για να φτάσουν στη Γη.

4.4 Περιορισμός του SIC

Η ανάλυση των προβλημάτων που πραγματοποιήθηκε στον προηγούμενο κεφάλαιο καθιστά αναγκαία την ανάλυση των πιθανών τρόπων με τους οποίους μπορούμε να περιορίσουμε το SIC στα συστήματα ισχύος και στα επίγεια τηλεπικοινωνιακά δίκτυα.

Εάν αποδειχθεί, με βεβαιότητα, ότι οι μετασχηματιστές, οι οποίοι διαρρέονται από SIC, αντιμετωπίζουν προβλήματα στη μόνωση, τότε η μείωση του SIC σε αυτούς είναι επιτακτική. Ωστόσο, ακόμη και αν η υποβάθμιση της μόνωσης δεν είναι σοβαρό πρόβλημα σε έναν συγκεκριμένο μετασχηματιστή, μπορεί να υπάρχουν και άλλοι παράγοντες που να υποδεικνύουν την ανάγκη για μείωση του SIC, όπως η παραγωγή υπερβολικών αρμονικών στους γειτονικούς πυκνωτές, κορεσμός στον πυρήνα ή σφάλμα στον μετασχηματιστή.

Έχουν γίνει προκαταρκτικές μελέτες ψηφιακών υπολογιστών και μελέτες παροδικών αναλυτών δικτύων, οι οποίες οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι, συσκευές που συνδέονται στον ουδέτερο εισάγοντας μία αντίσταση, έχουν τη δυνατότητα να περιορίσουν το SIC στα συστήματα ισχύος. Εναλλακτικά, μία συσκευή θυρίστορ και μία γραμμική αντίσταση με εκτροπή προς τη Γη φαίνεται να είναι υποψήφια ως τα στοιχεία τα οποία θα μπορούσαν να εισαχθούν στο ουδέτερο αγωγό και να συμβάλουν στον περιορισμό του SIC. Οι γενικές προδιαγραφές οι οποίες περιγράφουν μία συσκευή συνδεδεμένη στον ουδέτερο είχαν ως εξής [28]:

(α) Η ικανότητα περιορισμού του SIC σε $<1,0$ A,

(b) Η ικανότητα περιορισμού της τάσης AC στα 2 kV υπό συνθήκες σφάλματος απλής γραμμής προς το έδαφος, όταν το AC ρεύμα μπορεί να φθάσει τα 7000 A RMS,

(γ) Η ικανότητα να κρατήσει το ουδέτερο εντός ορίων BIL υπό συνθήκες κύματος ή σφάλματος,

(δ) Η ικανότητα να φέρει συνεχές AC ρεύμα 10 αμπερ RMS λόγω ανισορροπίας φορτίου ή αμετάβλητων γραμμών EHV.

Όσον αφορά την ικανότητα της συσκευής θυρίστορ να περιορίσει το SIC στον ουδέτερο αγωγό του μετασχηματιστή, έγινε μία μελέτη χρησιμοποιώντας τα δεδομένα του συστήματος του δικτύου μεταφοράς του Northern States Power Company. Το συγκεκριμένο δίκτυο αποτελούταν από 101 διαύλους, με 44 μεγάλους μετασχηματιστές όπου μία συσκευή θυρίστορ τοποθετήθηκε στον ουδέτερο αγωγό του κάθε μετασχηματιστή. Στην ανατολική-δυτική κατεύθυνση, το σύστημα μετάδοσης επεκτάθηκε από το Wisconsin έως τη Νότια Dakota. Σε όλες τις περιπτώσεις, η συσκευή θυρίστορ μείωσε το SIC στον ουδέτερο αγωγό σε τουλάχιστον 1% της τιμής που υπήρχε χωρίς συσκευή συνδεδεμένη στον ουδέτερο.

Τα παραπάνω οδηγούν στο συμπέρασμα ότι, μία συσκευή συνδεδεμένη στον ουδέτερο, η οποία θα οδηγούσε στον περιορισμό του SIC θα μπορούσε να γίνει πραγματικότητα, η οποία δεν θα προκαλούσε υπερβολικές προσωρινές τάσεις λόγω σφαλμάτων.

Ωστόσο, με τη πάροδο των ετών, έχουν διευρυνθεί οι τεχνικές με τις οποίες μπορούμε να προσεγγίσουμε λύσεις στο πρόβλημα, τεχνικές που προτείνονται από την CIGRE, όπως για παράδειγμα να εγκαταστήσουμε συσκευές αποκοπής (blocking devices) ή εμπέδησης στον ουδέτερο του μετασχηματιστή, να υιοθετήσουμε τα καλύτερα και πιο αναπτυγμένα μοντέλα του πυρήνα των μετασχηματιστών ή ακόμη και να επανασχεδιάσουμε ολόκληρο το δίκτυο έτσι ώστε η επίδραση του SIC να είναι ελάχιστη.

Ένας τρόπος για να περιορίσουμε την εμφάνιση του SIC στις γραμμές μεταφοράς, αποτελεί η τοποθέτηση πυκνωτών σε σειρά. Ωστόσο, αυτή η προσέγγιση μπορεί να αποτελέσει μεγάλο κόστος και σύνθετη μηχανική διεργασία ενώ στην προσπάθεια μας να περιορίσουμε το SIC σε συγκεκριμένο μέρος του δικτύου μπορεί να οδηγηθούμε σε αύξηση του SIC σε κάποιο άλλο. Συνιστάται, μόνο για περιοχές υψηλής εμφάνισης SIC. Στην πραγματικότητα, πολύ μεγάλες σε μήκος γραμμές μεταφοράς έχουν πυκνωτές σε σειρά, όχι για να περιορίσουν το SIC αλλά για να αντισταθμίσουν την άεργη ισχύς.

Ένας εναλλακτικός τρόπος για να περιορίσουμε το SIC στις γραμμές μεταφοράς είναι η εγκατάσταση συσκευών αποκοπής στον ουδέτερο των μετασχηματιστών. Η λύση αυτή αποτελεί, επίσης, μία πολύ κοστοβόρα προσέγγιση στο πρόβλημα και ενδείκνυται μόνο σε περιοχές υψηλής εμφάνισης SIC ή σε κρίσιμα συστήματα.



Εικόνα 7. Αισθητήρας SIC IMC Hall τοποθετημένος στο καλώδιο γείωσης [32].

Το μέγεθος του κορεσμού, λόγω SIC, ενός μετασχηματιστή εξαρτάται από τα υλικά και τη διαμόρφωση του. Κάθε τύπος κράματος που χρησιμοποιείται στον πυρήνα έχει τη δική του καμπύλη μαγνητισμού ωστόσο η χρήση συγκεκριμένων υλικών στον πυρήνα μπορεί να είναι πολύ σημαντική, ιδιαίτερα για μετασχηματιστές που βρίσκονται σε περιοχές υψηλής εμφάνισης SIC. Συγκεκριμένα, ειδικά κράματα από πυρίτιο και χάλυβα θα μπορούσαν να παρουσιάσουν καλύτερη απόδοση.

Τέλος, ιδανική αντιμετώπιση στο πρόβλημα αποτελεί η σωστή σχεδίαση του δικτύου. Ωστόσο, η παραπάνω προσέγγιση στην πράξη δεν είναι εφικτή αφενός επειδή το υπάρχων δίκτυο είναι ήδη αρκετά μεγάλο και αφετέρου επειδή περιλαμβάνει παλιό εξοπλισμό. Η τάση να χρησιμοποιούμε συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας συνεχούς ρεύματος υψηλής τάσης, το οποίο χρησιμοποιεί συνεχές ρεύμα για τη μαζική μεταφορά ηλεκτρικής ισχύος, μειώνει τις ευπάθειες στο σύστημα από SIC.

Αναφορές

- [1] J. A. Marusek, “Solar Storm Threat Analysis,” 2007.
- [2] I. G. Usoskin, “A history of solar activity over millennia,” *Living Rev. Sol. Phys.*, vol. 14, no. 1, p. 3, Dec. 2017, doi: 10.1007/s41116-017-0006-9.
- [3] Γεώργιος Καραγιαννίδης, Αναστάσιος Παναγιωτόπουλος, “Η επίδραση των ηλιακών καταργίδων στις τηλεπικοινωνίες”, Σεπτέμβριος 2019
- [4] “SDO | Solar Dynamics Observatory.”
<https://sdo.gsfc.nasa.gov/gallery/main/item/720> (accessed Mar. 06, 2021).
- [5] “Solar Storm and Space Weather - Frequently Asked Questions | NASA.”
https://www.nasa.gov/mission_pages/sunearth/spaceweather/index.html#q11
(accessed Mar. 01, 2021).
- [6] “Near Miss: The Solar Superstorm of July 2012 | Science Mission Directorate.”
https://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2014/23jul_superstorm/
(accessed Mar. 06, 2021).
- [7] “Geomagnetic storm - Wikipedia.”
https://en.wikipedia.org/wiki/Geomagnetic_storm#Occurrences (accessed Mar. 01, 2021).
- [8] S. Hu, S. Hu-1@nasa,) Gov, and H. Kbrwyle, “Solar Particle Events and Radiation Exposure in Space.” Accessed: Mar. 01, 2021. [Online]. Available:
https://sohowww.nascom.nasa.gov/publications/ESA_Bull126.pdf.
- [9] W. D. Gonzalez *et al.*, “What is a geomagnetic storm?,” *J. Geophys. Res.*, vol. 99, no. A4, p. 5771, 1994, doi: 10.1029/93ja02867.
- [10] “Disturbance storm time index - Wikipedia.”
https://en.wikipedia.org/wiki/Disturbance_storm_time_index (accessed Mar. 01, 2021).
- [11] L. R. Cander and S. J. Mihajlovic, “Forecasting ionospheric structure during the great geomagnetic storms,” *J. Geophys. Res. Sp. Phys.*, vol. 103, no. A1, pp. 391–398, Jan. 1998, doi: 10.1029/97JA02418.
- [12] “Real-time (Quicklook) Dst Index Monthly Plot and Table.” http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_realtime/202010/index.html (accessed Mar. 06, 2021).
- [13] “Geomagnetic storm - Wikipedia.” https://en.wikipedia.org/wiki/Geomagnetic_storm
(accessed Mar. 01, 2021).
- [14] K. Hattori, H. Hayakawa, and Y. Ebihara, “Occurrence of Great Magnetic Storms on 6–8 March 1582,” *arXiv*, vol. 487, no. 3. arXiv, pp. 3550–3559, May 20, 2019, doi: 10.1093/mnras/stz1401.
- [15] “Carrington Event - Wikipedia.” https://en.wikipedia.org/wiki/Carrington_Event
(accessed Mar. 01, 2021).
- [16] “Solar cycle 14 - Wikipedia.” https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_cycle_14 (accessed Mar. 01, 2021).

- [17] “Solar minimum - Wikipedia.” https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_minimum (accessed Mar. 01, 2021).
- [18] “List of solar storms - Wikipedia.” https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_solar_storms (accessed Mar. 01, 2021).
- [19] “May 1921 geomagnetic storm - Wikipedia.” https://en.wikipedia.org/wiki/May_1921_geomagnetic_storm (accessed Mar. 01, 2021).
- [20] “January 1938 geomagnetic storm - Wikipedia.” https://en.wikipedia.org/wiki/January_1938_geomagnetic_storm (accessed Mar. 01, 2021).
- [21] “Solar storm of August 1972 - Wikipedia.” https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_storm_of_August_1972 (accessed Mar. 01, 2021).
- [22] “March 1989 geomagnetic storm - Wikipedia.” https://en.wikipedia.org/wiki/March_1989_geomagnetic_storm (accessed Mar. 01, 2021).
- [23] “Bastille Day event - Wikipedia.” https://en.wikipedia.org/wiki/Bastille_Day_event (accessed Mar. 01, 2021).
- [24] “Halloween solar storms, 2003 - Wikipedia.” https://en.wikipedia.org/wiki/Halloween_solar_storms,_2003 (accessed Mar. 01, 2021).
- [25] “Solar storm of 2012 - Wikipedia.” https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_storm_of_2012 (accessed Mar. 01, 2021).
- [26] T. Maynard, N. Smith, and S. Gonzalez, “Solar storm Risk to the north American electric grid Key Contacts.” <https://www.lloyds.com/~media/lloyds/reports/emerging-risk-reports/solar-storm-risk-to-the-north-american-electric-grid.pdf> (accessed Mar. 06, 2021).
- [27] J. J. Love, G. M. Lucas, A. Kelbert, and P. A. Bedrosian, “Goelectric Hazard Maps for the Mid-Atlantic United States: 100 Year Extreme Values and the 1989 Magnetic Storm,” *Geophys. Res. Lett.*, vol. 45, no. 1, pp. 5–14, 2018, doi: 10.1002/2017GL076042.
- [28] S. C. Tripathy, “Solar-induced-currents in power systems: Cause and effects,” *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-92, no. 2, pp. 471–477, 1973, doi: 10.1109/TPAS.1973.293746.
- [29] D. H. Boteler and R. J. Pirjola, “Comparison of methods for modelling geomagnetically induced currents,” *Ann. Geophys.*, vol. 32, no. 9, pp. 1177–1187, Sep. 2014, doi: 10.5194/angeo-32-1177-2014.
- [30] D. H. Boteler and R. J. Pirjola, “Modeling geomagnetically induced currents,” *Sp. Weather*, vol. 15, no. 1, pp. 258–276, 2017, doi: 10.1002/2016SW001499.
- [31] D. H. Boteler and R. J. Pirjola, “Comparison of methods for modelling geomagnetically induced currents,” *Ann. Geophys.*, vol. 32, no. 9, pp. 1177–1187, 2014, doi:

10.5194/angeo-32-1177-2014.

- [32] CIGRE Power system technical performance, “Understanding of geomagnetic storm environment for high voltage power grids”, Reference: 780, October 2019
- [33] G. M. Lucas, J. J. Love, A. Kelbert, P. A. Bedrosian, and E. J. Rigler, “A 100-year Geoelectric Hazard Analysis for the U.S. High-Voltage Power Grid,” *Sp. Weather*, vol. 18, no. 2, pp. 1–15, 2020, doi: 10.1029/2019SW002329.