

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 62 (1971)
Heft: 1

Artikel: Leistungshalbleiter für Gleichrichter-Triebfahrzeuge der Penn Central Transportation Co.
Autor: Kelley, W.E. / Foley, E.P.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-915788>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 03.04.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Leistungshalbleiter für Gleichrichter-Triebfahrzeuge der Penn Central Transportation Co.

Beitrag zu der Diskussionstagung des SEV vom 3./4. November 1970 in Zürich,

von *W. E. Kelley* und *E. P. Foley*, Philadelphia

621.314.632.049:621.335
(Übersetzung)

Es wird hier eine Übersicht gegeben über die Verwendung von Gleichrichterausrüstungen für Zugförderung in den Vereinigten Staaten. Die Vereinigten Staaten sind nicht so dicht mit Bahngeleisen überzogen wie europäische Länder. Wir haben ungefähr 211 400 Meilen-Eisenbahnlinien auf dem Festland der Vereinigten Staaten; davon sind rund 2400 Strecken-Meilen elektrifiziert.

Unser jährliches Transportvolumen, ausgedrückt in Tonnen-Meilen, ist ungefähr 780 Milliarden und diese Förderleistung ist schon seit mehreren Jahren nahezu konstant. Wir haben einen bedeutenden Personenverkehr, doch dieser ist zur Hauptsache konzentriert auf Vorortsverkehr in der Umgebung der verschiedenen grossen Städte.

Der grösste Teil unseres Rollmaterials ist alt. Die letzte Bestellung für elektrische Lokomotiven wurde vor rund 15 Jahren erteilt; allerdings werden jährlich dieselektrische Lokomotiven laufend ersetzt. Vor 10 Jahren begannen wir Rollmaterial für Personenverkehr im Vorortsbetrieb in beschränkten Mengen zu ersetzen. Im Anhang zu diesem Vortrag ist eine Übersicht im Detail geboten.

Die beschränkte Menge von neu beschafftem Rollmaterial hat auch die Verwendung von modernen Traktionsausrüstungen behindert.

Der elektrische Betrieb auf der früheren Pennsylvania Railroad begann mit Gleichstrom im Gebiet der Stadt New York. Der Grund hierfür ist die gute Eignung des Gleichstrommotors für Zugförderung.

Als dann sowohl die Pennsylvania und die New Haven Railroads zum Schluss kamen, dass eine Elektrifikation mit Wechselstrom sowohl leistungsfähiger als auch billiger wäre, war noch keine Gleichrichterausrüstung verfügbar, welche auf die Triebfahrzeuge eingebaut werden könnte. Die Versorgung der Industrie erfolgte damals mit Drehstrom 25 Hz und Energie war erhältlich; man kam deshalb zum Schluss, dass der Wechselstrom-Seriefahrmotor einen brauchbaren Kompromiss darstellen würde, sowohl für die Ausrüstung von Lokomotiven wie für Triebwagen.

In den Jahren 1931 und 1932 wurde eine Studie durchgeführt, um mittels gittergesteuerten Quecksilberdampf-Gleichrichtern eine Einphasen-Lokomotive mit einer Leistung von 1000 PS bei einer Fahrleitungsspannung auszurüsten. Wegen schaltungstechnischen Schwierigkeiten, aber auch wegen Drehmomentbegrenzungen kam man zum Schluss, dass ein solcher Vorschlag keine brauchbare Lösung darstellen würde. Ein ähnliches Resultat lieferte ein Versuch auf New Haven im Jahre 1914 mit einem Triebwagen, ausgerüstet mit einem 250-PS-Motor und Quecksilberdampf-Gleichrichter.

Im Dezember 1949 rüstete die Pennsylvania Railroad den kombinierten Personen/Gepäcktriebwagen Nr. 4561 versuchs-

weise mit einem wassergekühlten Ignitron-Gleichrichter von Westinghouse aus.

Dieser lieferte vom 25-Hz-Einphasen-System Gleichstrom an 2 Fahrmotoren mit einem Nennstrom von je 250 A dauernd, bei einer Klemmenspannung von 650 V. Fig. 1 zeigt das Prinzipschema dieses Triebwagens. Es war tatsächlich die erste erfolgreiche Anwendung einer Gleichrichterausrüstung auf einem Fahrzeug. Versuche über Beeinflussung von Telefonlinien wurden mit diesem Wagen durchgeführt, indem man seinen Einfluss verglich mit anderen Wechselstrom-Triebwagen und Lokomotiven der Pennsylvania Railroad. Es wurde festgestellt, dass dieser Triebwagen keine grössere Beeinflussung verursachte und in einigen Fällen sogar weniger, verglichen mit konventionellem Wechselstrommaterial, und das ohne spezielle Filterausrüstung.

Mit einer Filterausrüstung angeschlossen an die Sekundärseite des Transformators konnte der Geräuschpegel wesentlich reduziert werden. Anfangs 1952 folgten dieser ersten Verwendung von Gleichrichtern zwei Probelokomotiven, bestehend aus je zwei 3000-PS-Einheiten, die dauernd miteinander gekuppelt waren. Diese Maschinen waren mit Westinghouse-Ignitron-Gleichrichtern und Gleichstrommotoren ausgerüstet.

Mit diesen beiden Lokomotiven wurden ausgedehnte induktive Beeinflussungsversuche durchgeführt, welche detailliert im AIEE-Paper 54-110 beschrieben wurden. Die Fig. 2 zeigt die Messanordnung, wie sie auf diesen beiden Lokomotiven verwendet wurde. Diese Versuche — auf dem Triebwagen Nr. 4561 und mit den ersten Hochleistungs-Gleichrichter-Lokomotiven — zeigten, dass die durch moderne Ignitron-Gleichrichter erzeugten induktiven Beeinflussungen eine durchaus beherrschbare und relativ mässige Höhe erreichten, welche zudem durch verhältnismässig kleine und einfache Filter auf den Lokomotiven oder Triebwagen verringert werden konnten.

Nach diesen Versuchsausführungen folgte ab 1954 die Lieferung von 100 Gleichrichter-Triebwagen für Vielfachsteuerung sowie von 10 Gleichrichter-Lokomotiven hoher Geschwindigkeit für die Förderung von Reisezügen mit einer Leistung von je 4000 PS an die New Haven Railroad. Die Fig. 3 und 4 zeigen das Prinzipschema der Starkstromausrüstung dieser Fahrzeuge.

Im Jahre 1956 nahm die Virginian Railway zwölf 3300 PS Ignitron-Gleichrichter-Lokomotiven in Betrieb. Diese Maschinen leisten nun Dienst auf der Penn Central, da sie vorher durch die New Haven käuflich übernommen worden sind.

Die Pennsylvania Railroad setzte 1958 sechs Prototyp-Triebwagen in Betrieb, um damit einen Anfang zu machen mit dem Ersatz von Triebwagen für Vorortsbetrieb mit modernen, leistungsfähigen Fahrzeugen für hohe Geschwindigkeit und hohe Beschleunigung. Es handelte sich um 85 Fuss

lange Wagen, ausgerüstet mit Gleichrichtern. Als Ersatz für nicht mehr betriebstaugliche Wechselstrom-Lokomotiven kamen im Zeitraum 1960–1963 66 sechssächsige Gleichrichter-Lokomotiven zur Ablieferung; sie sind unter der Typenbezeichnung E44 bekannt und weisen eine Leistung von je 4400 PS auf.

Der ursprüngliche Entwurf und auch die Ausführung der E44 stützte sich auf die Verwendung von Gleichrichtern, bestehend aus je 12 Ignitron-Gefäßen, wie dies in Fig. 5 dargestellt ist, da damals noch keine geeigneten Silizium-Gleichrichter oder Thyristoren verfügbar waren. Indessen hatte man die Überzeugung, dass durch die Verwendung von luftgekühlten Silizium-Gleichrichtern störanfällige Bestandteile von Ignitron-Gleichrichtern, wie Zündstromkreise, Wasserkühlung und Temperaturregelung, ersetzt werden könnten. Deshalb rüstete man Lokomotive Nr. 37 mit Halbleitern aus. Wie Fig. 6 zeigt, bestand der Gleichrichter aus einer Brückenschaltung mit total 384 Siliziumdioden, mit einer Nennleistung von 250 A, 600 V PRV. Das Verhalten dieser Lokomotive war so zufriedenstellend, dass die letzten 5 Einheiten der obengenannten Bestellung ebenfalls mit Silizium-Gleichrichtern ausgerüstet worden sind. Eine weitere Verbesserung führte man auf der letzten Einheit ein, durch Verwendung von Siliziumdioden mit 1200 V PRV; damit gelang es, die Zahl von Dioden in Serie von 12 auf 6 zu verringern und die totale Stückzahl von 384 auf 192.

Schliesslich baute man 22 von den ursprünglichen Ignitron-Lokomotiven auf Siliziumdioden-Gleichrichter um, ebenfalls unter Verwendung von Dioden mit 1200 V PRV; gleichzeitig konnte die Nennleistung der Fahrmotoren erhöht werden, und man änderte die Getriebeübersetzung, so dass diese Lokomotiven nun eine Nennleistung von 5000 PS aufweisen. Es ist beabsichtigt, diesen Umbau auf Silizium-Gleichrichter unter entsprechender Erhöhung der Nennleistung bei allen Lokomotiven des Typs E44 durchzuführen. Die Hauptstromkreise der E44-Lokomotive sind in Fig. 7 dargestellt. Am Ende des letzten Lokomotivbeschaffungsprogrammes im Jahre 1963 gelangten 38 für Vielfachsteuerung eingerichtete Triebwagen zur Ablieferung. Mit der Inbetriebnahme dieser Wagen können die veralteten Wechselstrom-Triebwagen der Pennsylvania Railroad sukzessive aus dem Betrieb gezogen werden.

Diese neuen Wagen sind unter dem Namen Silver-Liners bekannt, und es sind die ersten Triebwagen der Bahnverwaltung, welche mit Silizium-Leistungsgleichrichtern kombiniert mit einer Anschmittsteuerung, anstelle der üblichen Stufentransformatoren, ausgerüstet sind. Der Hauptgleichrichter besteht aus 3 Brücken zu je 24 Siliziumdioden, von denen jede eine Nennspannung von 600 V PRV und einen Nennstrom von 250 A aufweist. Diese Leistungs-Gleichrichter-Brückenordnung ist an die Transformator-Sekundär-Wicklung über zwei

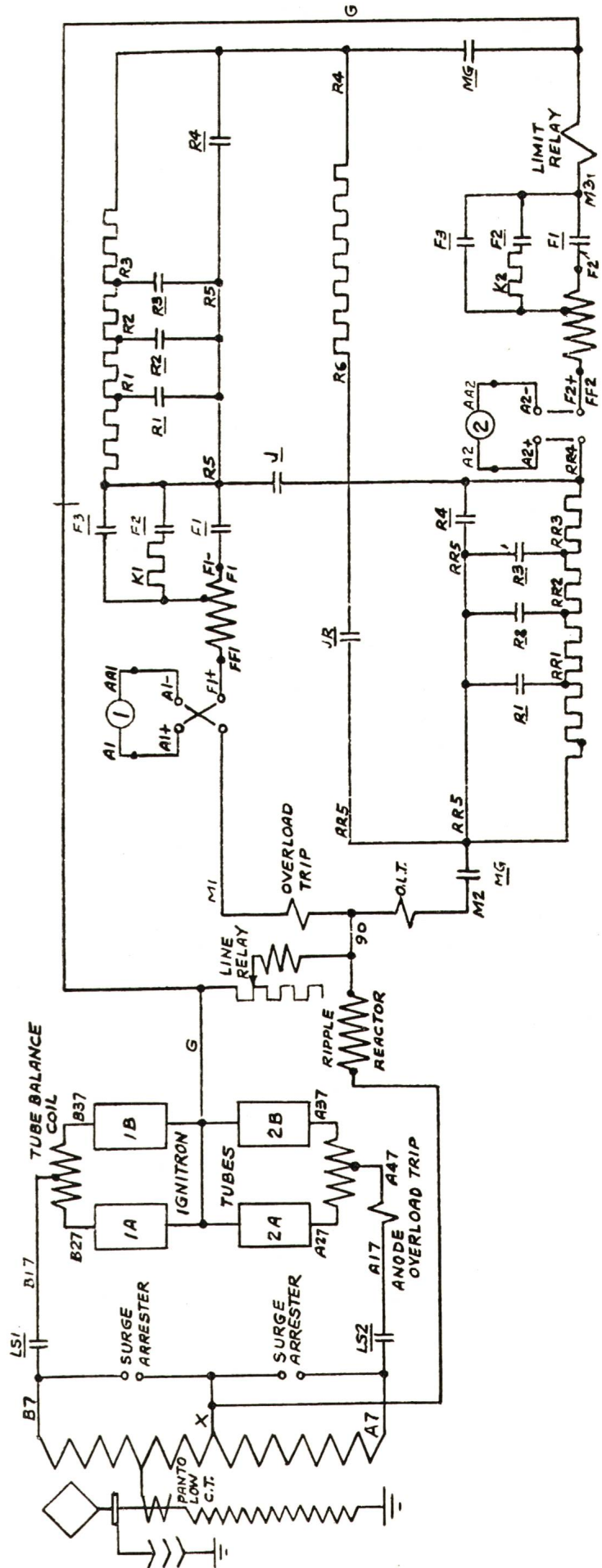


Fig. 1

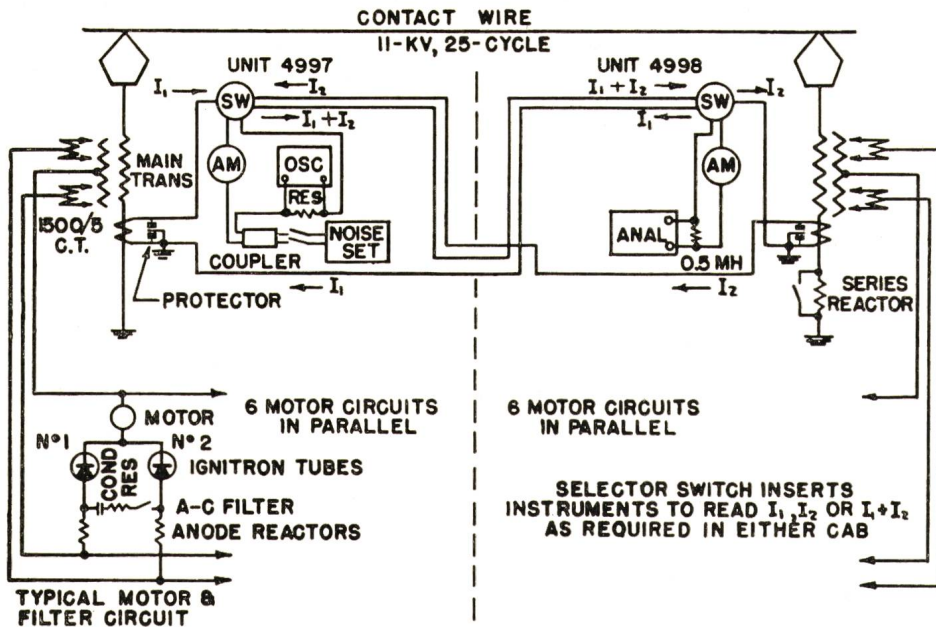


Fig. 2

luftgekühlte Ignitron-Gefäße angeschlossen, welche mittels Anschnittsteuerung die Spannungsregelung gestatten. Die Ignitrons weisen einen Nennstromeffektivwert von 386 A auf; die max. zulässige Spannung beträgt 7000 V. Dieser erste Schritt vom Stufentransformator zur stufenlosen Steuerung ist schematisch in Fig. 8 dargestellt. 20 weitere Silver-Liners von im wesentlichen gleicher elektrischer und mechanischer Konstruktion gelangten 1967 in Betrieb, und eine weitere Bestellung für 100 Einheiten ist gegenwärtig im Verhandlungsstadium.

In den Jahren 1968 und 1969, in Zusammenarbeit mit dem Staat New Jersey, nahm die Bahnverwaltung 35 Schnelltriebwagen, ebenfalls für Vielfachsteuerung in Betrieb; sie dienen dem Vorortverkehr zwischen Trenton, New Jersey und der Stadt New York. Sie können eine max. Geschwindigkeit von 100 Meilen pro Stunde erreichen. Die unter dem Namen Jersey ARROW bekannten Wagen gleichen in ihrer Konstruktion den Silver-Liners, sind aber, wie in Fig. 9 dargestellt ist, die ersten der Bahnverwaltung, welche mit Thyristorsteuerung ausgerüstet sind. Die elektrische Ausrüstung gestattet zudem, sie entweder mit 11 kV, 25 Hz oder 25 kV, 60 Hz an der Fahrleitung zu betreiben.

Im Februar 1969 fuhr einer dieser Wagen unter 25 kV, 60 Hz. Die elektrische Muskingum-Bahn, welche sich im Besitz der American Electric Power Company in Ohio befindet, war die erste Gesellschaft in den Vereinigten Staaten, welche unseren elektrischen Vororttriebwagen mit dieser Fahrleitungsspannung und Normalfrequenz betrieben hat; der Versuch verlief in jeder Hinsicht sehr erfolgreich.

Die Hauptstromversorgung dieser Wagen besteht aus einem Haupttransformator mit 3 Sekundärwicklungen. Jede dieser Wicklungen ist an eine Siliziumdioden-Gleichrichterbrücke angeschlossen, und alle 3 Brücken sind wieder in Serie geschaltet, um auf diese Weise den Hauptgleichrichter zu bilden. Die gleichgerichtete Ausgangsspannung ist gegeben durch die Anzahl von Sekundärwicklungen, welche eingeschaltet sind. Zwischen der ersten Sekundärwicklung und ihrem zugehörigen Silizium-Gleichrichter ist ein statisches Thyristorregelsystem eingebaut, welches die dem Gleichrichter zugeführte Wechselspannung mittels Anschnittsteuerung zu verändern

gestattet und somit die Ausgangsspannung des Gleichrichters von einem Minimum bis zum Maximum regelt. Die Nenndaten der hier verwendeten Thyristoren sind 1100 V und 175 A, während die Silizium-Gleichrichter 1800 V und 240 A als Nenndaten aufweisen.

Gemeinsam mit der Pennsylvania Railroad arbeitete das Bundesverkehrsministerium der Vereinigten Staaten ein Projekt aus zur Entwicklung und Erprobung eines Schnellverkehrs mittels elektrischer Triebwagen für die Strecke New York Stadt und Washington DC. 50 Wagen wurden in den Jahren 1967/68 gebaut und bis zu einer Geschwindigkeit von 160 Meilen pro Stunde ausprobiert. Die Hälfte der Triebwagen ist mit einer elektrischen Ausrüstung von Westinghouse ausgestattet. Die

andere Hälfte erhielt eine General-Electric-Ausrüstung.

Die elektrischen Steuer-, Schutz- und Hilfssysteme dieser Triebwagen enthalten verschiedene Neuerungen, welche bereits in zahlreichen Veröffentlichungen ausreichend beschrieben worden sind. Die Grundschialtung für das Leistungsgleichrichtersystem besteht indessen aus 3 Gleichrichterbrücken, bestückt mit Siliziumdioden und einer zusätzlichen Anschnittsteuerung für eine Brücke, ein identisches System also, wie es schon bei den Silver-Liners und Jersey-ARROW-Triebwagen angewendet worden war. Die Anschnittsteuerung erfolgt in den Triebwagen mit Westinghouse-Ausrüstung durch Thyristoren, während die Apparatur von General Electric luftgekühlte Ignitrons enthält.

Für die elektrische Bremsung werden in den Triebwagen mit General-Electric-Ausrüstung die Anker der seriegelassenen Fahrmotoren umgeschaltet; die Regelung des Bremsstromes erfolgt durch Seriewiderstände und eine Zusatzspannung, welche von der Transformator-Sekundärwicklung über die Anschnittsteuerung geliefert wird.

Die von Westinghouse ausgerüsteten Wagen enthalten eine elektrische Bremse unter Verwendung eines thyristorgesteuerten Gleichstromstellers. In jedem Triebwagen sind 2 gleichartige Bremsstromkreise vorgesehen, je einen für das vordere Drehgestell mit Motor 1 und 2 und einen 2. für das hintere Drehgestell mit Motor 3 und 4.

Die von General Electric gelieferten Ignitrons mit Anschnittsteuerung weisen dieselben Nenndaten auf wie diejenigen der Silver-Liner-Triebwagen.

Die Nennspannung der Dioden ist 1200 V PRV, der Nennstrom 250 A. Die Dioden in der Westinghouse-Ausrüstung, sowohl der Gleichrichter als auch der Chopper, weisen eine Nennspannung von 1200 V und einen Nennstrom von 520 A auf. Die Nenndaten der Thyristoren, sowohl für die Steuerung des Wechselstroms wie auch diejenigen im Chopper, betragen 1100 V und 175 A. Seit 1966 sind diese elektrischen Lokomotiven in der Leistungsklasse von 3000–3600 PS mit Wechselstrom-Generatoren und Silizium-Gleichrichtern, anstelle der Gleichstrom-Generatoren, ausgerüstet, wie dies auf allen dieselektrischen Lokomotiven früherer Bauart die Regel war.

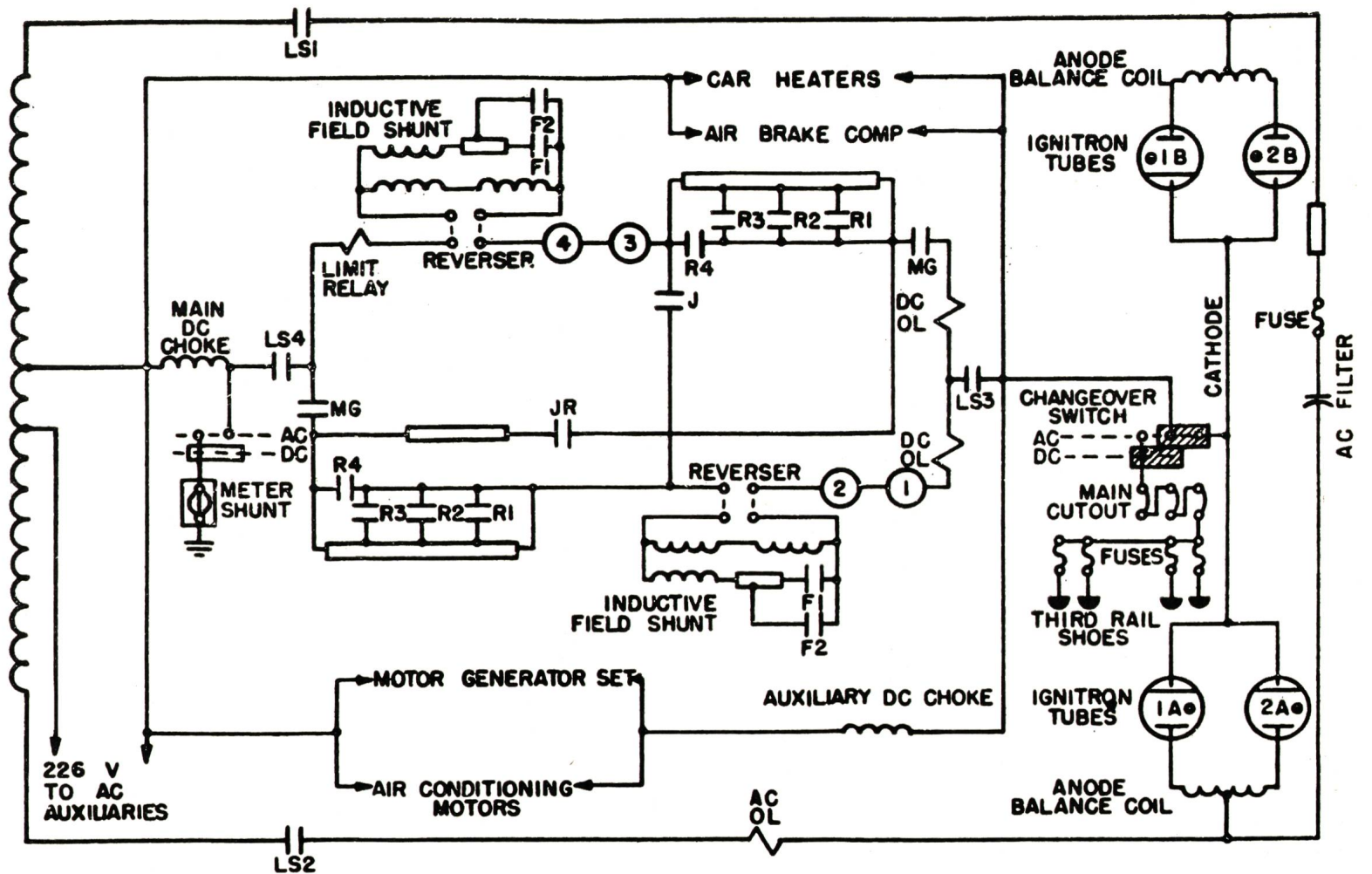
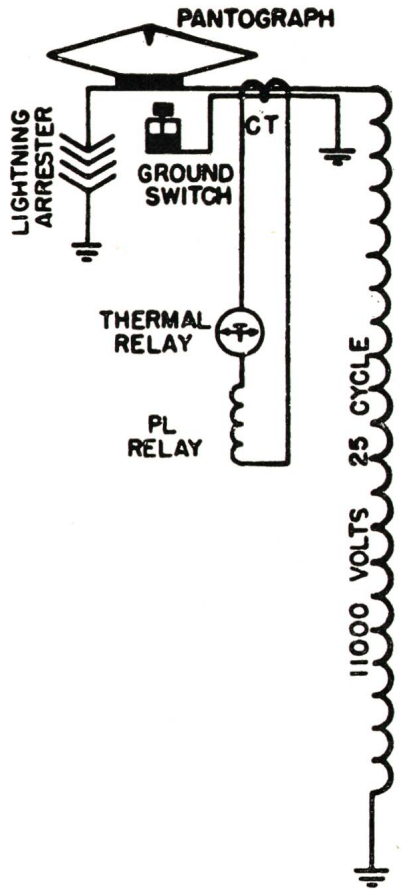


Fig. 3

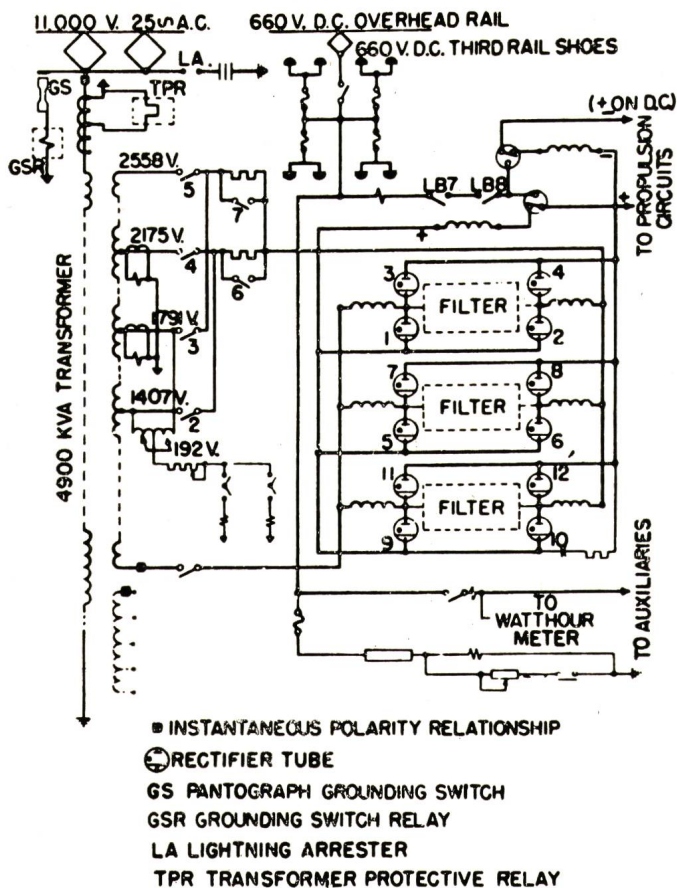


Fig. 4

Ein typischer Generator der Electromotive-Division von General Motors, die unter dem Namen ARIO bekannte Generatorengruppe, besteht aus dem Dreiphasen-Hauptgenerator, einem Hilfsgenerator, ebenfalls Drehstrom für Erregung des Hauptgenerators, wie auch für die Energieversorgung der Kühlgebläse und gewisser Erregersteuerorgane und einer Siliziumdioden-Gleichrichtergruppe, welche direkt auf das Gehäuse des Drehstromgenerators angebaut ist. Die vom Hilfsgenerator für die Erregung des Hauptgenerators gelieferte Energie wird über eine gesteuerte Gleichrichterbrücke abgegeben; das Zündsystem enthält Fühler- und Begrenzungskreise.

Das Drehstromgenerator-Gleichrichtersystem von General Electric ist ähnlich, ausgenommen, dass hier ein Gleichstrom-Hilfsgenerator für die Erregung des Hauptgenerators zur Verwendung gelangt.

Die von ALCO gebauten dieselelektrischen Lokomotiven verwenden die gleichen Drehstromgenerator-Gleichrichterausüstung wie die Lokomotiven von General Electric.

Nennspannung und Nennstrom der Gleichrichter, wie sie auf den dieselelektrischen Lokomotiven verwendet werden, sind von der gleichen Grössenordnung wie diejenigen auf den elektrischen Lokomotiven und Triebwagen.

Aus den verschiedenen Schaltschemen geht hervor, dass alle elektrischen Gleichrichter-Lokomotiven wie auch die Triebwagen für Vielfachsteuerung mit einem Filter zur Dämpfung von induktiven Telefonstörungen versehen sind. Die Filter bestehen aus einer Kombination von Widerstand und Kapazität, welche über eine Sicherung an die Sekundärseite des Haupttransformators angeschlossen ist. Die Wünschbarkeit

solcher Filter ergab sich aufgrund von Versuchen, welche die frühere Pennsylvania Railroad und die frühere New Haven Railroad nach Inbetriebsetzung von 100 Gleichrichter-Triebwagen und 10 Gleichrichter-Lokomotiven durchgeführt hatten. Aus diesen Versuchen liessen sich folgende Schlüsse ziehen:

1. Eine grosse Zahl von Gleichrichter-Triebfahrzeugen ergibt keinen kumulativen Effekt.
2. Gleichrichter-Triebfahrzeuge ohne Filter auf der Wechselstromseite erzeugen ungefähr den gleichen Geräuschpegel wie Wechselstrom-Triebfahrzeuge unter ähnlichen Lastbedingungen.
3. Gleichrichter-Triebfahrzeuge mit Filtern auf der Wechselstromseite erzeugen niedrigeren Geräuschpegel gegenüber Wechselstromfahrzeugen mit Direktmotoren unter ähnlichen Belastungsbedingungen.

Alle mit Gleichrichtern ausgerüsteten Triebfahrzeuge der Penn Central, elektrische Lokomotiven, Triebwagen wie auch dieselelektrische Lokomotiven, fahren über Geleise, welche mit Stromkreisen für die Betätigung automatischer Blocksignale wie auch für die sogenannten cab-signals in den Führerständen der Triebfahrzeuge ausgerüstet sind. Es ist zwar zu vermerken, dass nicht alle Triebfahrzeuge cab-signals enthalten.

Das System der cab-signals basiert auf einem dauernd über die Schienen fliessenden, aber codierten Wechselstrom, welcher zur Betätigung der cab-signals in den Führerständen, in 2 oder 4 Aspektausführung, dient.

Es werden die folgenden Codierungen verwendet:

Anzeige im Führerstand	Code-Unterbrechungen pro Minute
Offen	180
Annäherung-Mittel	120
Annäherung	75
Halt	kein Code

Die Penn Central verwendet 2 Arten von Schienenstromkreisen, 100 Hz und ein Minimum von 2 A oder 140 Hz und ein Minimum von 0,5 A. Für die Betätigung der verschiedenen Signale längs der Strecke werden unterschiedliche Leistungsniveaus, wie auch Wechselstrom- und Gleichstromkreise, verwendet.

Die Penn Central verfügt auch über eine sogenannte intermittierende induktive Zugsicherung. Dank diesem System ist der Lokomotivführer gezwungen, auf Signale, welche eine Geschwindigkeitsreduktion verlangen, zu reagieren. Der Führer muss das Befahren eines solchen Signales quittieren; unterlässt er diese Quittierung, so wird automatisch eine Bremsung des Zuges ausgelöst. Die Übertragung von Signalen von der Strecke auf die Lokomotive erfolgt über Magnete, welche einerseits am Geleise und andererseits an den Triebfahrzeugen montiert sind.

Auf dem Netz der Penn Central haben sich keine Fehlanzeigen oder Fehloperationen irgendeines dieser Sicherheitssysteme ereignet, welche auf Beeinflussungen von den Gleichrichtern auf Lokomotiven oder Triebwagen herrühren könnten.

Die Association of American Railroads hat Berichte von verschiedenen Bahnverwaltungen erhalten, dass gewisse mit Drehstrom-Generatoren ausgerüstete, dieselelektrische Lokomotiven Frequenzen erzeugen, welche in die Gleisstromkreise gelangen und auf diese Weise Störungen an den Steuerungen von automatischen Barrieren an Niveauübergängen verursachen. Die AAR untersucht dieses Problem.

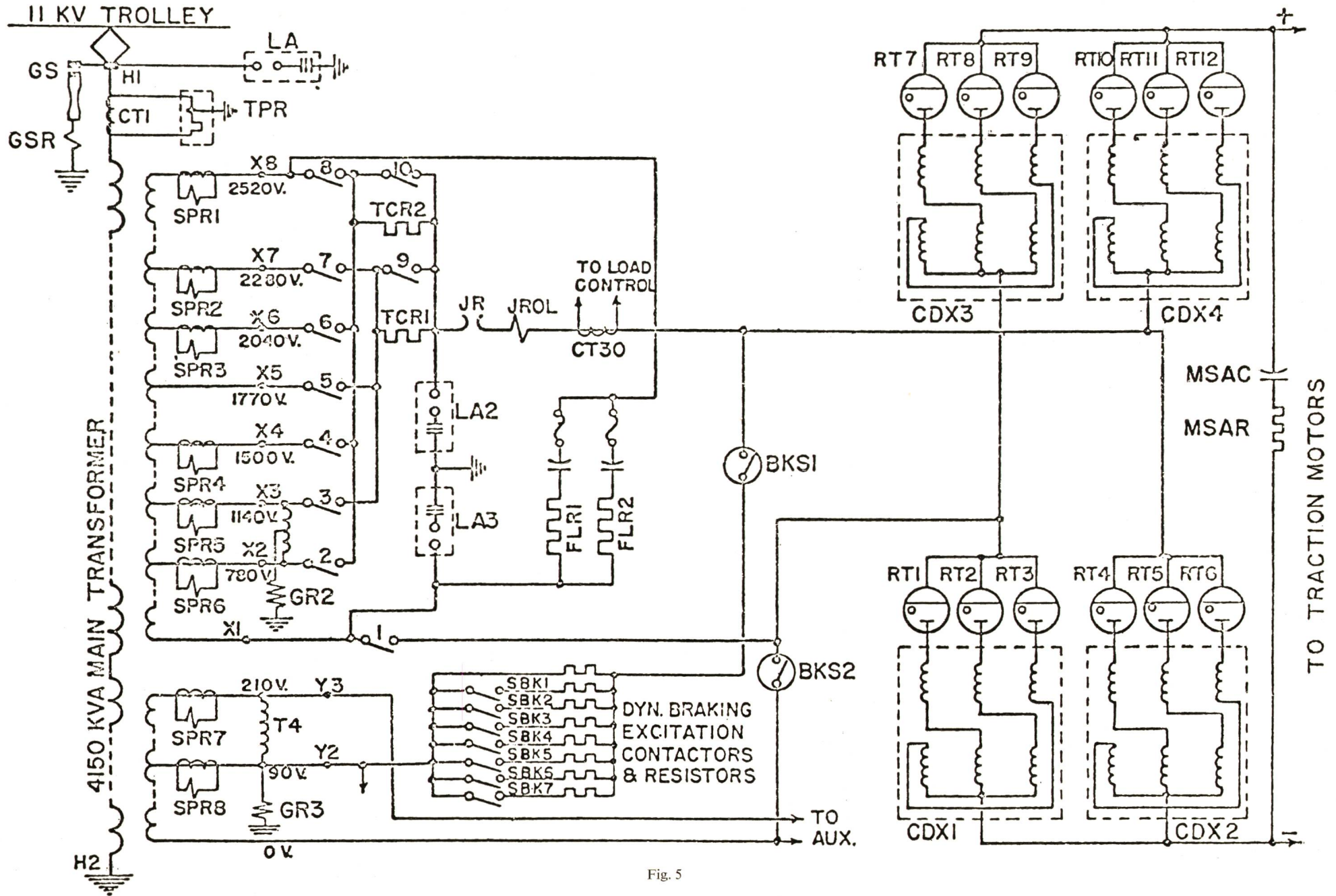


Fig. 5

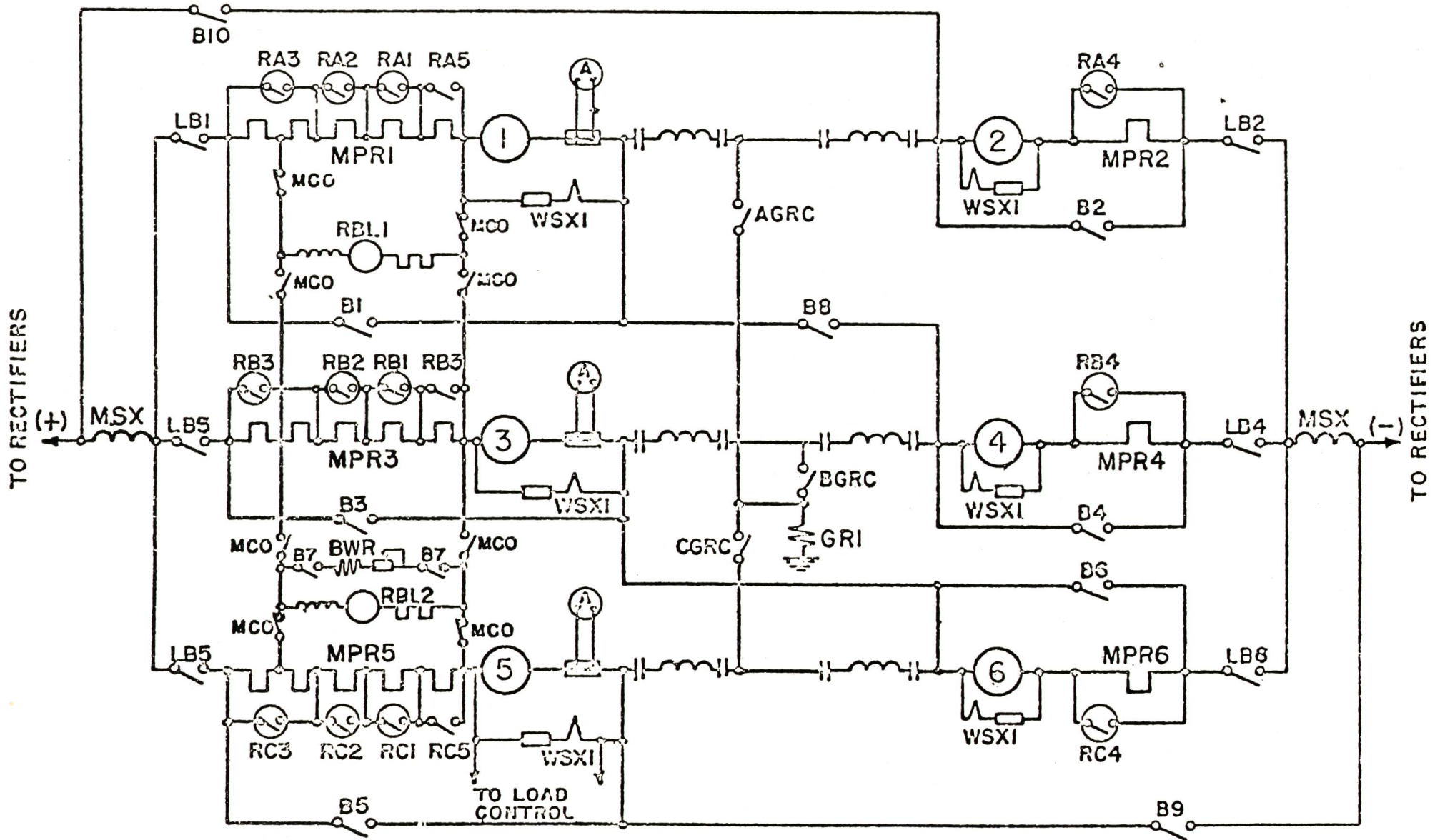


Fig. 7

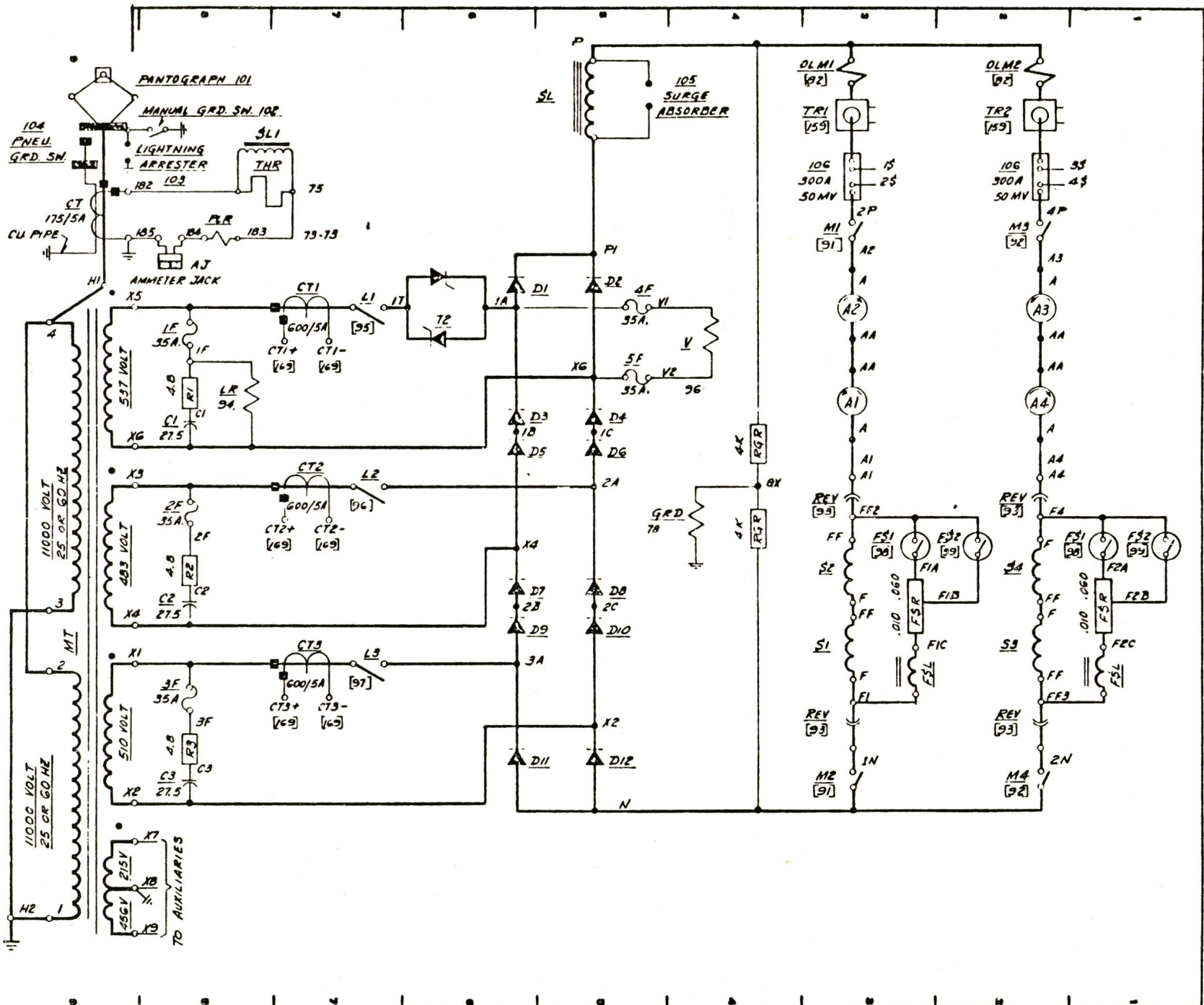


Fig. 9

Adresse des Autors:
 W. E. Kelley, Chief Electrical Engineer, Penn Central Railroad Co.,
 Philadelphia, PA; USA.