

新幹線周波数変換変電所およびき電用変電所

Frequency Changer Station and Feeding Substations for the New Tōkaidō Line

井上 浩* 田中 富士彦*
 Hiroshi Inoue Fujihiko Tanaka
 高山 尚* 西 政 隆**
 Takashi Hatakeyama Masataka Nishi

内 容 梗 概

東海道新幹線は、大容量、高速の列車が50/60の両地域にまたがって運行される。このためのき電方式としては、スコット巻線変圧器による25kVき電により、かつ、セクション数の少ない方面別異相き電方式が採用されている。

また、列車は60専用なので50地区には50/60周波数変換機が設置された。これらのき電設備は種々の技術的問題を解決して建設されたものである。

1. 緒 言

東海道新幹線は、走行区間が50,60両地域にまたがり、列車としては60車を走行させること、また1列車の容量が15MVAにも達し、かつ200km/hの高速で走る点など従来の交流電化に比べ、画期的なもので、そのき電回路もこれらきびしい要求に合致するものとする必要があり、その建設には幾多の技術的問題を解決しながら建設された。すなわち、50地区には50/60周波数変換機を設置するとともに、約20kmおきに30MVAのき電用変電を設け、き電方式としては25kV 60単相交流方式を採用し、上下線別置相き電方式とした。

日立製作所では、西相模変電所周波数変換設備、清水、岩淵、沼津、熱海各き電用変電設備一式のうち、主要機器を製作納入した。以下これら周波数変換設備、き電用変電所の概要について述べる。

2. 新幹線のき電系統

東海道新幹線のき電系統は従来わが国で実施されてきた交流電化方式に比べ、幾多の特長を有している。そのおもな点は次のとおりである。

(1) 新幹線の電源は、東京・富士川付近の間約140kmが50地区、富士川以西、大阪までの約370kmが60地区である。一方車両は軽量、簡易化を図るため60専用となっているので、50地区には周波数変換設備を設置して、60電力を供給している。

(2) 列車1編成の容量は起動加速時15MVAに達する大容量のもので、これが将来は約5分おきに運転される。したがってき電回路のインピーダンス降下を考慮して負荷点のき電電圧を20kVに確保するため単相交流25kVき電方式とし、30MVAき電変電所が東京・大阪間に約20kmおきに25箇所設置されている。

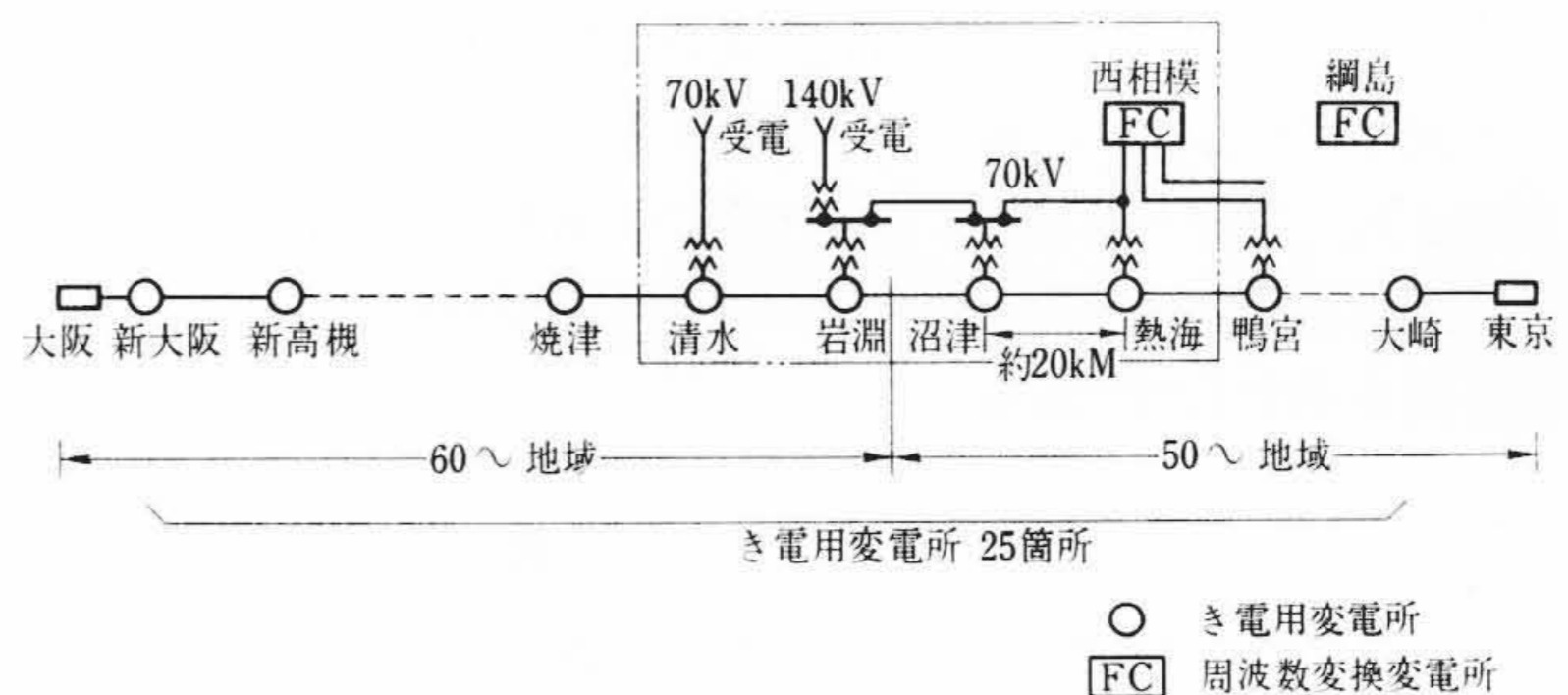
(3) 列車速度は最高200km/hと従来に比べ2倍の速度で運転されるので、き電系統のセクションの数を少なくして高速運転における集電を有利に

するため、従来の方面別異相き電方式にかわり、上下線別異相き電方式とした。

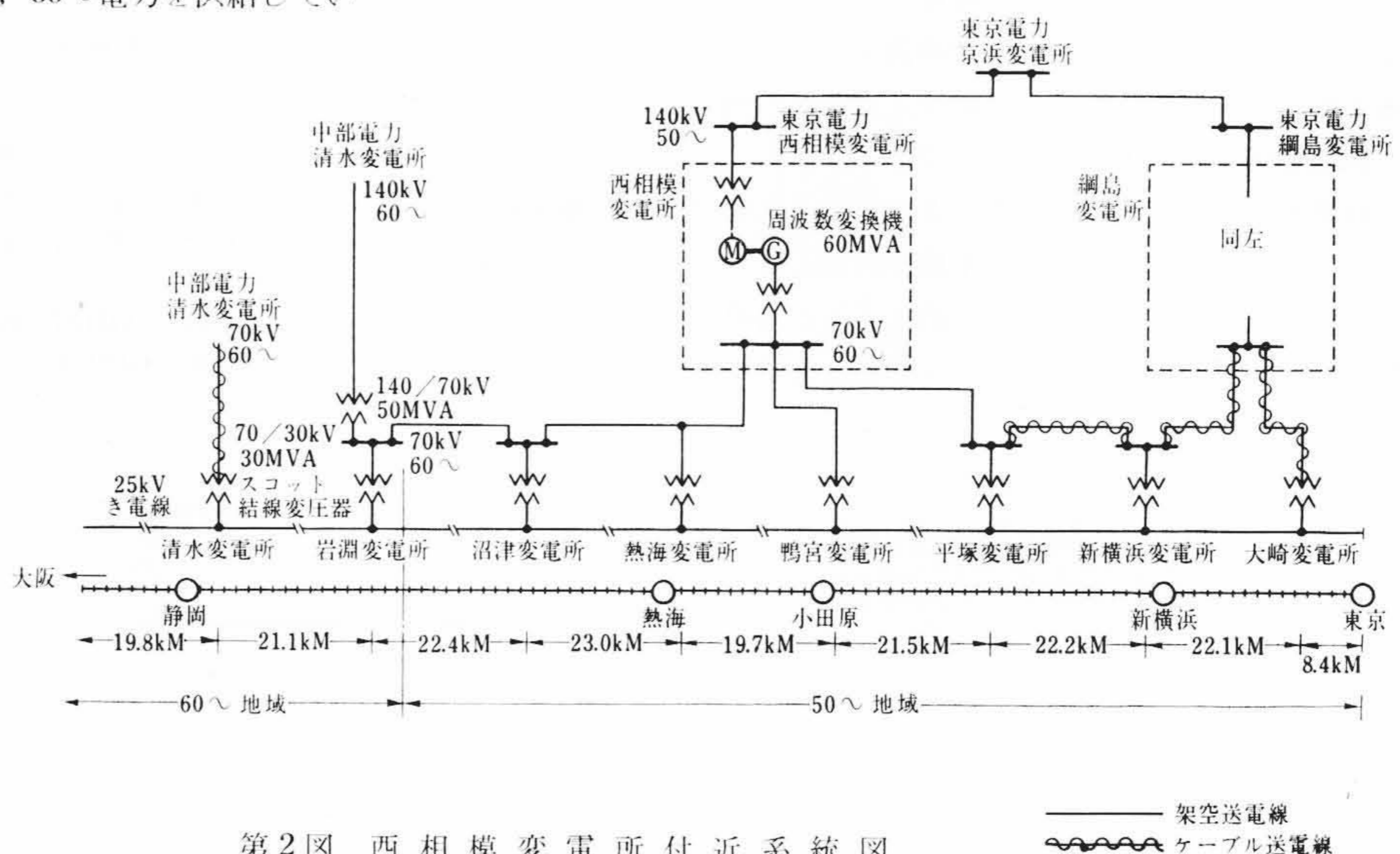
第1図はき電系統概要を示したもので、このうち二重鎖線で囲んだ周波数変換用の西相模変電所および清水、岩淵、沼津、熱海の各き電変電所主要機器を日立製作所が一括製作、納入した。

2.1 周波数変換

周波数変換変電所は西相模（小田原付近）と綱島（横浜付近）に設置され、第2図に示すように50を受電、60MVA特殊公称定格三相同期周波数変換機1台によって60に変換、70kV送電線によって大崎・沼津間6箇所の各き電用変電所に送電している。また、周波数変換設置1台の停止時には岩淵変電所の50MVA 140/70kV 60の設備を通じ熱海変電所までをき電するようになっている。

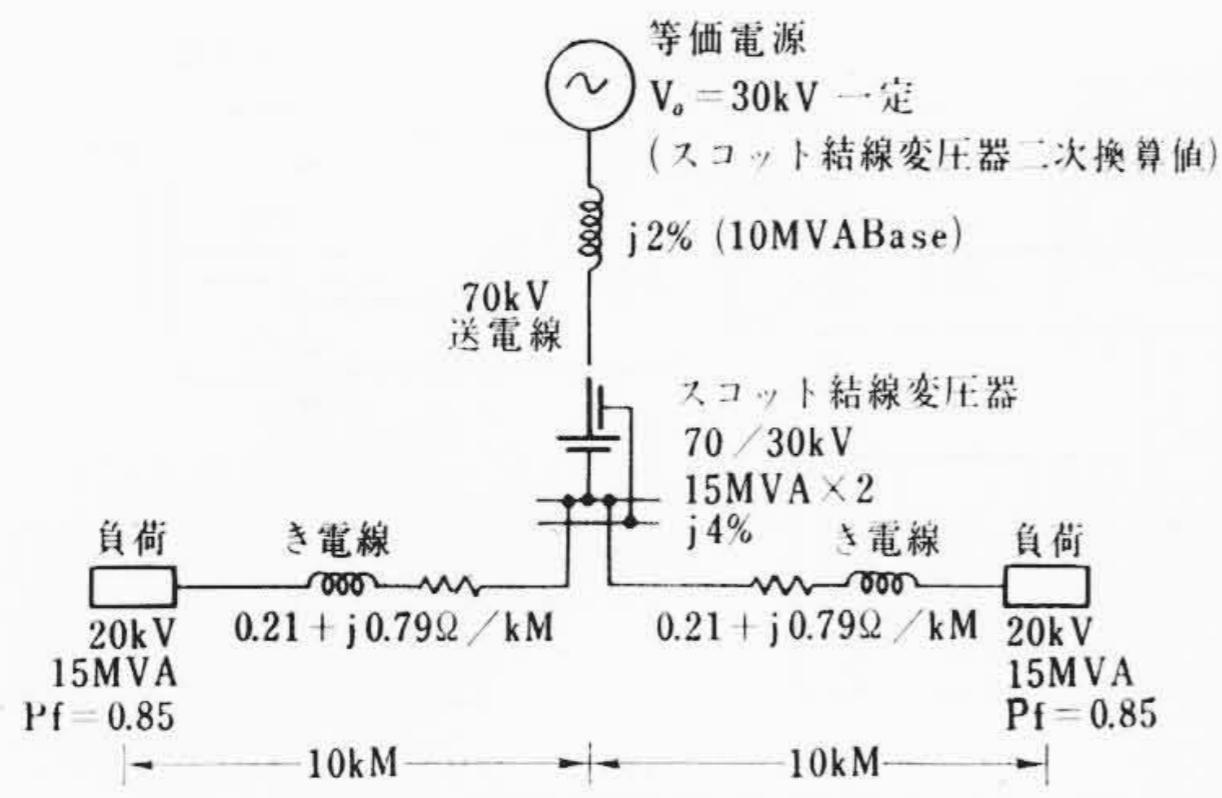


第1図 き電系統概要

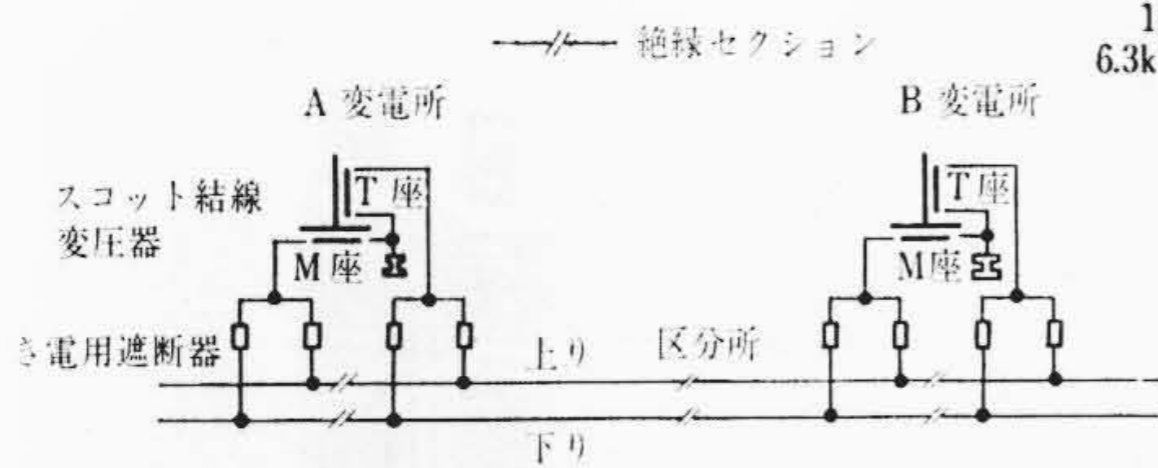


第2図 西相模変電所付近系統図

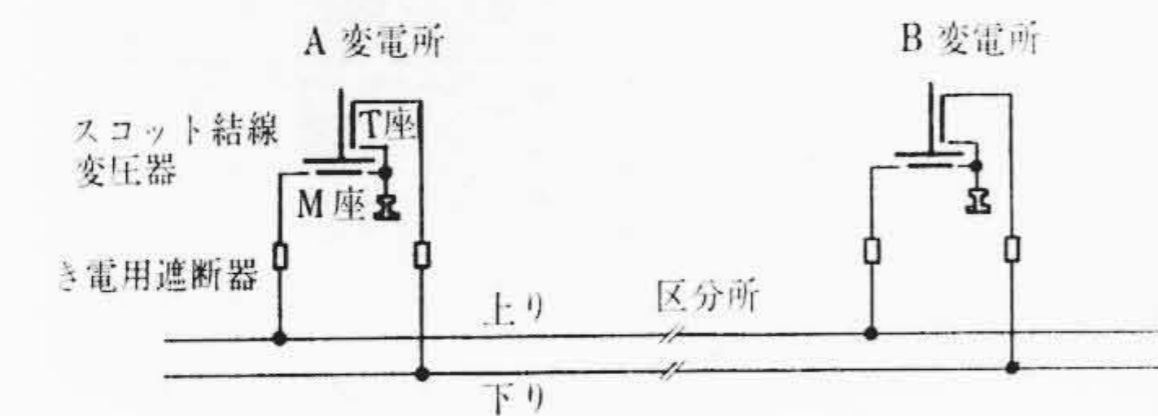
* 日立製作所国分工場
 ** 日立製作所日立工場



第3図 き電回路インピーダンス図



(a) 方面別異相き電方式



(b) 上下線別異相き電方式

第4図 き電方式説明図

周波数変換機の負荷は、単相の列車負荷であるから常に不平衡負荷であり、場合によっては完全な単相負荷となる。このような不平衡負荷が加わる三相発電機においては、回転子の過熱、振動、電圧の不平衡などの問題があり、これらについて事前に十分な検討が行なわれた。この結果、単相容量は三相容量の50%まで許容するものとして機器を設計、電圧不平衡に対しては、発電機の逆相インピーダンスを7.5%程度に、また逆電圧用変圧器のインピーダンスも4%におさえた。振動防止については、特殊構造を採用するなどの考慮が払われている。

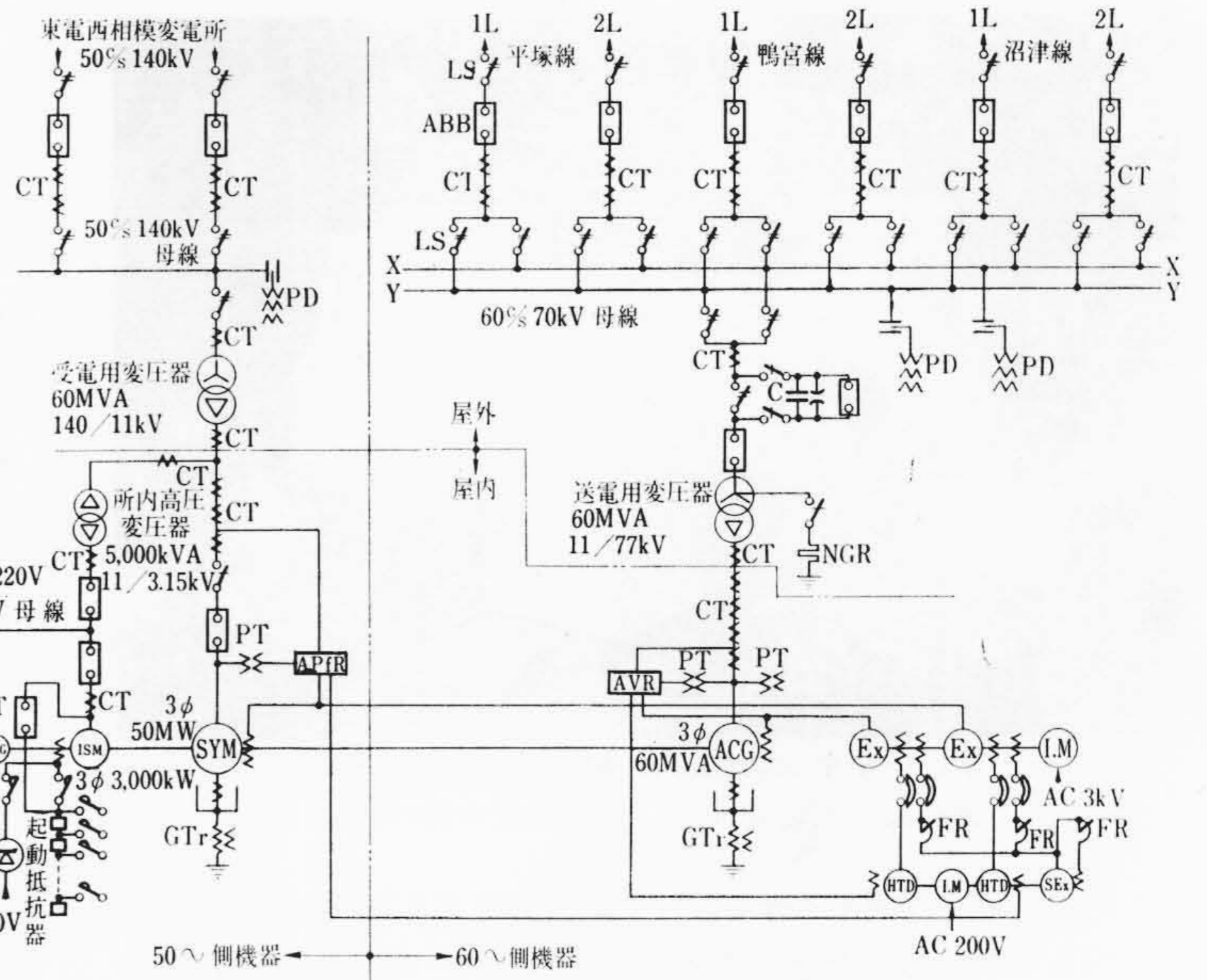
また列車の整流装置から発生する高調波の周波数変換機に対する影響を少なくするため、高調波フィルタを60～70kV母線に設置するとともに、発電機に自動電圧調整器、同期電動機には自動力率調整器を設け、負荷の急変に対しても、周波数変換機が安全に運転できるようにしてある。

2.2 き電系統

き電系統としては、スコット結線変圧器による単相交流25kV 60～き電方式を採用しているが、最大負荷15MVAの列車が同時に発車した場合を考慮して、スコット結線変圧器の容量はM座、T座それぞれ15MVAの30MVAとしている。第3図はき電変電所のき電線両端において列車が同時に発車した場合のインピーダンス図を示し、電源電圧30kVとして負荷点における電圧を20kVに維持するため、スコット結線変圧器のインピーダンスは4%程度としてある。

なお、電源電圧の変動は、周波数変換機に接続されない変電所ではスコット結線変圧器を負荷時タップ切換装置付として電圧調整を行ない、また周波数変換機系統に接続される変電所は周波数変換機で電圧調整を行なっている。

き電回路は、従来の交流電化方式においては、第4図(a)のように、スコット結線変圧器のM座、T座をそれぞれ同一方面にき電する方面別異相き電方式を採用していた。このため、変電所直下およ



第5図 西相模変電所単線接続図

び中間に絶縁セクションを設け、列車がここを通過するたびにだ行を行っていた。新幹線においては、第4図(b)のように上下線別にスコット結線変圧器のM座、T座からき電する上下線別き電方式を採用して、変電所直下のセクションを省略し、かつ変電所中間には区分所をもうけ、セクションも自動切換とし、ノッチインしたまま列車が高速で通過できるよう計画されている。

3. 周波数変換設備

周波数変換を行なう西相模変電所は、東京電力株式会社西相模変電所に隣接して建設され、第5図の単線接続図に示すように、140kV 50～2回線で受電する。これを60MVA特殊公称定格140kV/11kV受電用変圧器にて11kVに降圧し、三相50MW特殊公称定格同期電動機に直結された三相60MVA特殊公称定格交流発電機により60～に変換される。60～電力は60MVA特殊公称定格11/77kV送電用変圧器に接続された連絡送電線により、各き電変電所に供給される。

また周波数変換機の起動、停止用には、三相3,000kW誘導同期電動機が直結されている。

変電所の補機類は、500kVA 3.15kV/220V所内低圧変圧器により運転される。このほか所内予備用として6kV受電設備がある。

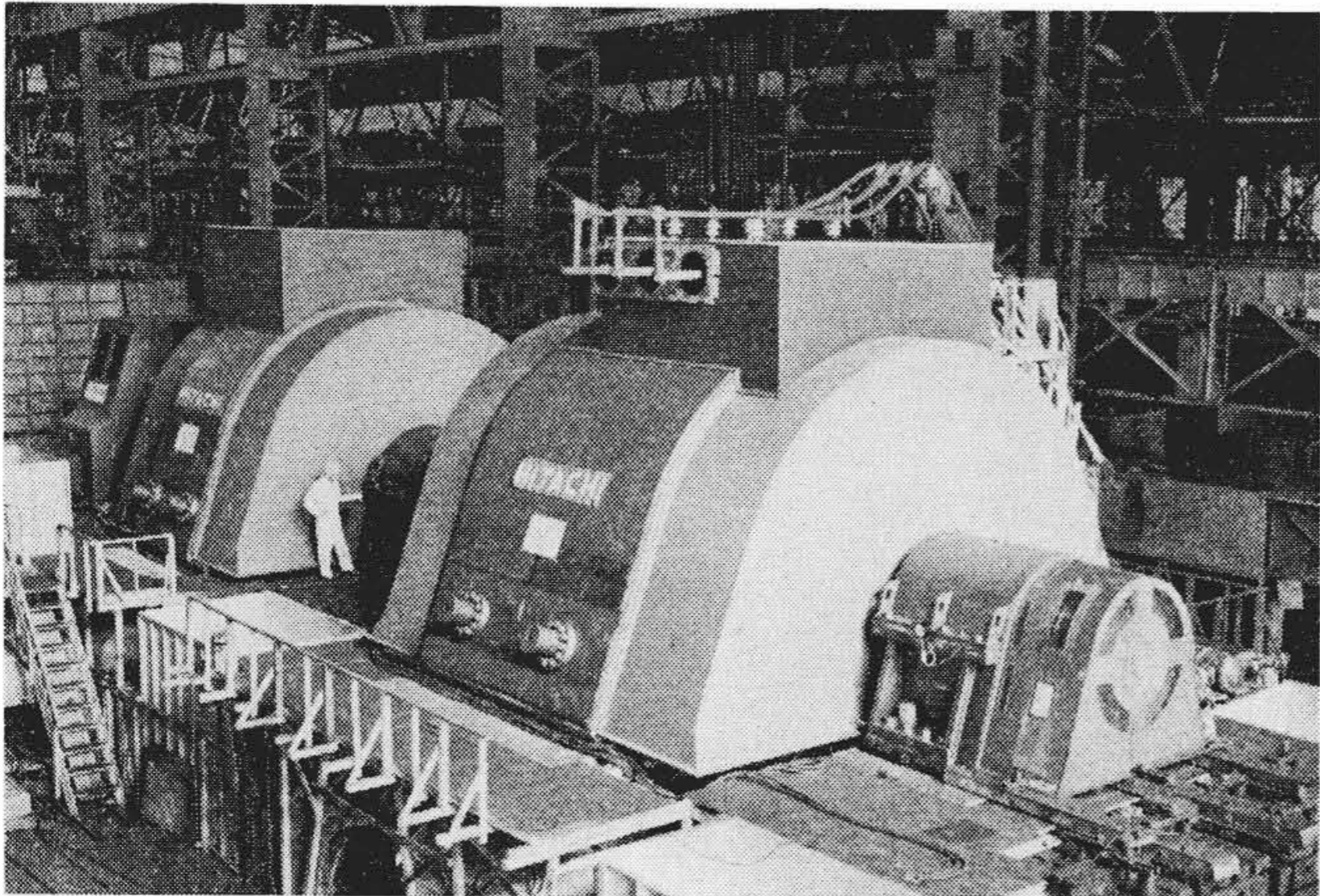
3.1 周波数変換機

周波数変換機は横軸構造で、交流発電機、同期電動機、起動用誘導同期電動機の順序に直結される。第6図はその外観を示す。誘導同期電動機は起動、停止時に使用されるが、常時も直結したまま運転される。

3.1.1 交流発電機

交流発電機は凸極回転界磁式で、固定子を両端の軸受でささえる構造となっており、その一端はカップリングにより同期電動機に直結される。冷却方式は閉鎖通風循環式で下部に空気冷却器をそなえている。仕様は下記のとおりである。

出力	三相 60,000 kVA 単相 30,000 kVA
定格	特殊公称
電圧	11 kV
周波数	60～
回転数	600 rpm
力率	0.75 (遅れ)
なお、この発電機の特長は	



(左より起動用誘導同期電動機, 同期電動機, 交流発電機)
第 6 図 工場完成した周波数変換機の外観

(1) 強力な制動巻線を設けて単相負荷による回転磁界の逆相分を吸収するに十分な熱容量を持たせ、かつ局部加熱を防止するため、回転子の磁束通路中に 1 ターンを形成しないようにしたこと。

(2) 単相負荷による 2 倍周波の脈動トルクが基礎に伝わらないよう固定子わくと鉄心の間をスプリングを介して連結して脈動トルクを吸収するように考慮したこと。

(3) 単相負荷による電圧の不均衡を少なくするため、固定子線輪を重ね巻 1 層 1 回巻とし、逆相インピーダンスを 7.5% としたこと。

などである。

3.1.2 同期電動機

同期電動機は交流発電機とほぼ同一の構造で、回転子両端に設けられたカップリングにより交流発電機および起動用誘導同期電動機と直結されている。同期電動機の仕様は下記のとおりである。

出力	50,000 kW
定格	特殊公称
電圧	11 kV
周波数	50~
回転数	600 rpm
力率	0.90 (進み)

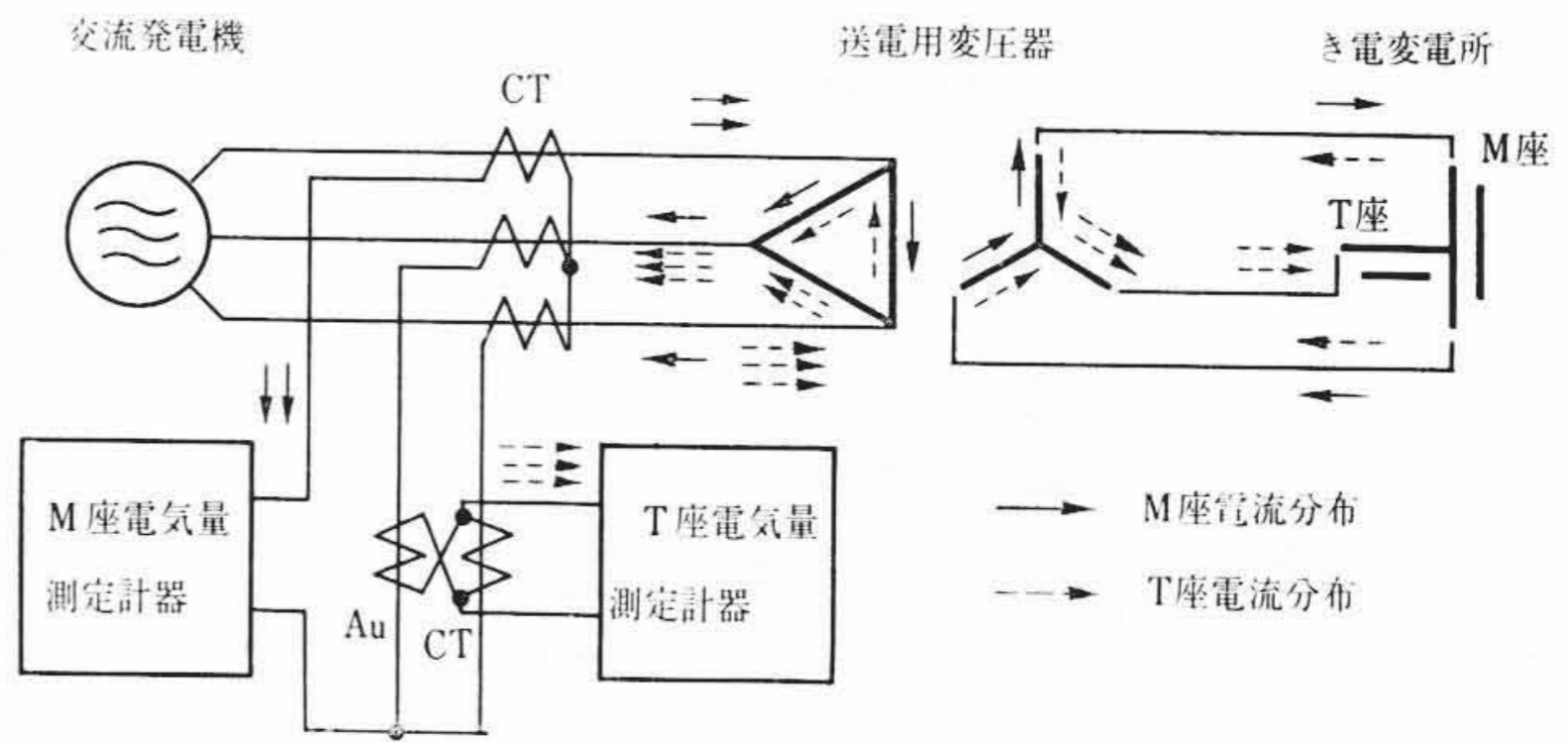
なお、同期電動機は交流発電機のような単相負荷による問題がないので、固定子鉄心はスプリングを介さずに直接固定子わくに保持されており、固定子線輪は重ね巻 2 層 1 回巻となっている。

3.1.3 起動用誘導同期電動機

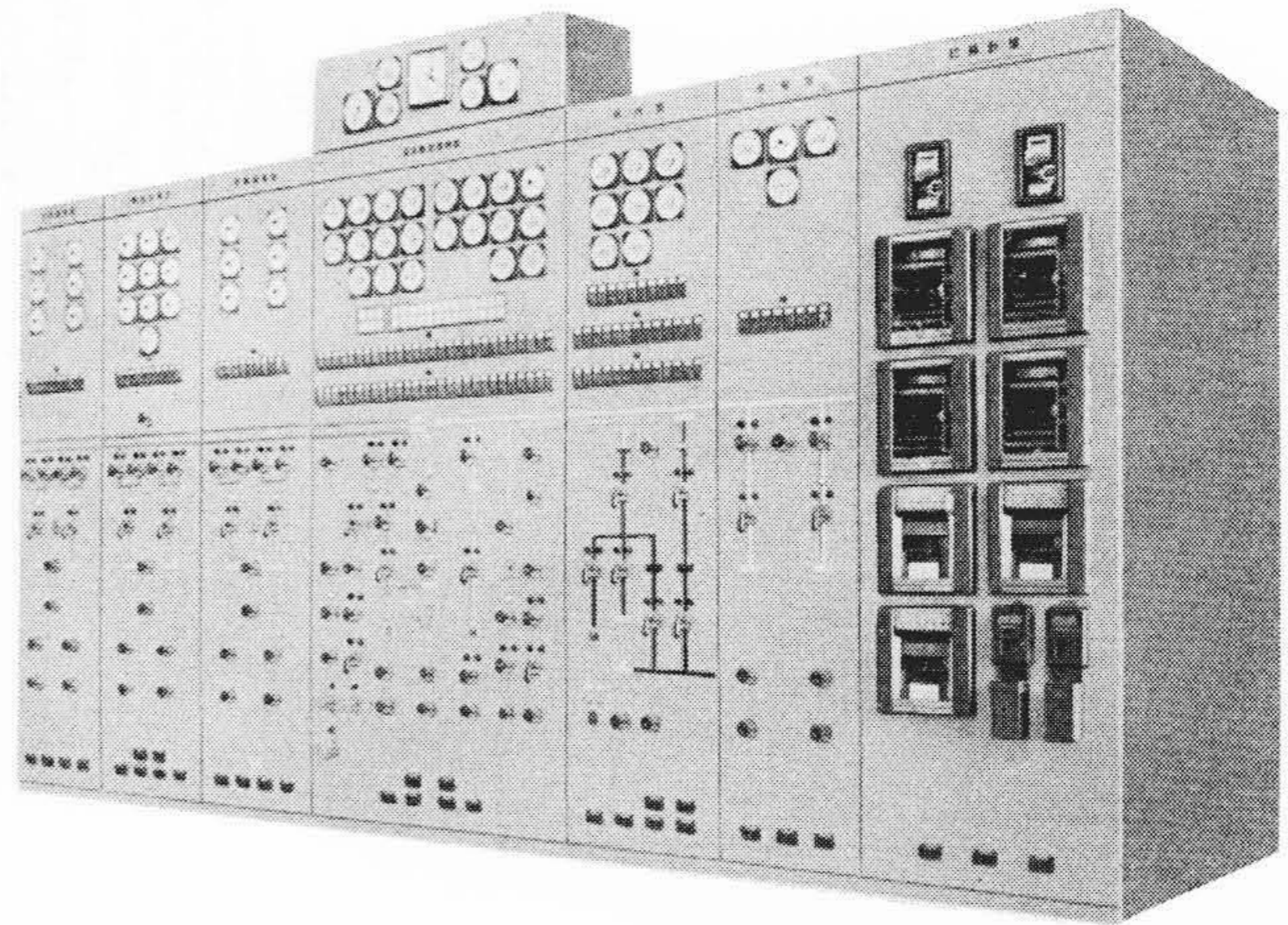
起動電動機には誘導同期電動機を使用した。起動電動機の仕様は下記のとおりである。

出力	3,000 kW
定格	30 分
電圧	3,000 V
周波数	50~
回転数	600 rpm
力率	1.0
制動方式	発電制動
負荷 GD ²	1,400 t - m ²

起動方式は、巻線形三相誘導電動機と同様であり、回転子に起動抵抗を接続して起動回転数の上昇に伴って順次抵抗値を減少、最後に短絡して直流励磁を与え、同期電動機として運転し、主同期電動機並列後回絡から切り離す。停止の場合は、起動用電動機に発生した電力を、起動抵抗器に消費させて発電制動を行なう。



第 7 図 M, T 座電気量測定回路



第 8 図 西相模変電所納計器操作盤

そのほか、この起動用電動機には将来周波数変換機 2 台が並列運転されることを考慮して、固定子を軸の周りに回転させて、発電機の電機子巻線と磁極との関係位置を調整できるように、位相調整装置を設けている。

3.2 制御・保護方式

周波数変換機の制御方式としては、一人制御方式によっており、順序制御開閉器により、停止、準備、起動、励磁、電動機並列、発電機並列の任意の状態までの操作が可能である。

起動は、直結の誘導同期電動機により、また急停止も本電動機を使用した発電制動方式でいずれも約 10 分間で完了する。

本周波数変換機の運転上の特長は、発電機自体は三相形であるが、スコット変圧器を通じ単相負荷を供給するので、第 7 図に示すように、発電機端子において、T 座、M 座において、電圧・電流・電力・電力量・力率などを測定している点である。

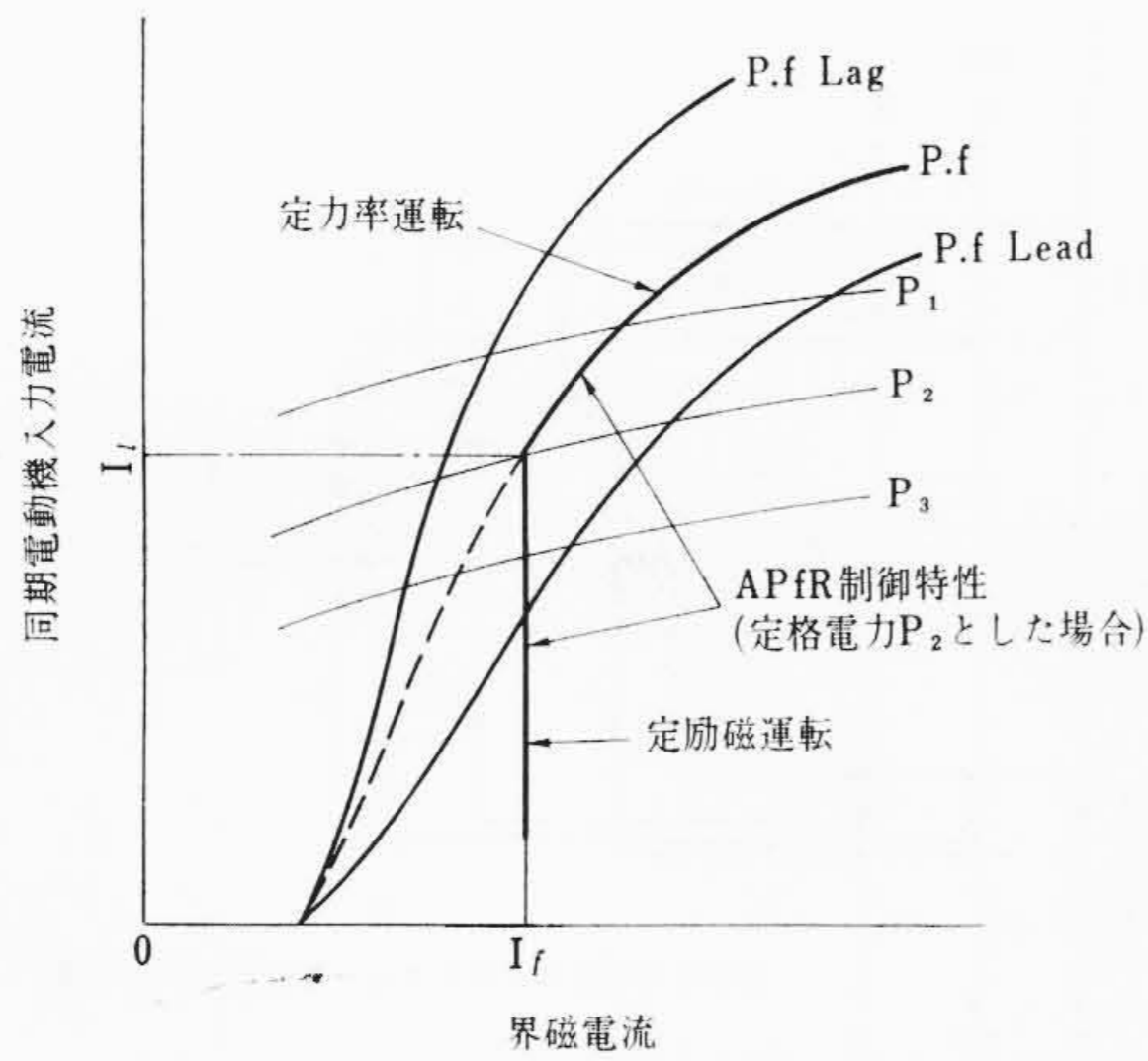
保護方式は、電動機に対し巻線短絡・接地、過電圧、界磁喪失、同期はずれ・逆電力・過速度、発電機に対し、巻線短絡・接地・過電圧・界磁喪失などの保護を行なうことのほか、軸受の温度上昇・油圧低下・冷却水圧低下などに対し主機を保護する。なお電動機、発電機および油タンクの火災に備え CO₂ 消火装置が設備されている。

第 8 図は西相模変電所納計器操作盤の写真である。

3.3 電圧・力率調整

単相大容量列車負荷の急激な変動により、周波数変換機の発電機側端子電圧と同期電動機側に流入する負荷電力の無効分は大幅に変化する。このため発電機側には自動電圧調整器を、同期電動機側には自動力率調整器 (APFR) を設けている。

50~側同期電動機の力率調整は、単に定力率調整のみでは、軽負荷運転時に急激な大容量負荷がかかったとき、電動機に流入する負荷電力が極端な遅れとなり、ついには脱調にいたる可能性がある。このため第 9 図に示すように、同期電動機に流入する電力が一定値 (図では P₂) 以下では界磁に一定電流を与え、一定電力以上では定



第9図 自動力率調整器制御特性

力率調整を行なう方式を採用し、急激な負荷変動に対しても、周波数変換機は安定して追従することができるようにした。すなわち力率の検出および負荷電力の検出は磁気増幅器により行ない、これにより、回転増幅器 (HTD) を通じ、励磁機を制御する方式となっている。

また発電機の自動電圧調整は、一般の発電機と異なり負荷変動の大なることと、変動ひん度の高いことのために、界磁調整・抵抗器を固定とし、回転増幅器 (HTD) のみで電圧調整を行ない、急激な電圧変動に対しても十分制御できるよう設計されている。

4. き電用変電所

き電用変電所は第10図単線接続図に示すように、70 kV 60 \sim 受電設備一式、70/30 kV 30 MVA スコット結線変圧器1台 (将来は2台) および上下線計4回線のき電設備が設置されている。スコット結線変圧器のM座は上り線に、T座は下り線にそれぞれ接続される。き電回路の遮断器には空気遮断器が使用され、変電所休止による延長き電の場合、セクション切換開閉器として使用できるよう、主回路結線および連動が考慮されている。

4.1 スコット結線変圧器

単相交流電化では、三相電源から大きな単相負荷をとるので、電源側に不平衡を生じ、同一電源に接続されている回転機に逆相電流を供給して温度上昇や効率の低下、騒音の増加などの悪影響を及ぼすおそれがある。

国鉄の交流電化においては、不平衡率 (逆相電圧/正相電圧 \times 100%) を変電所母線で3%以下にすることを目標として、スコット結線変圧器による三相/二相変換方式を採用している。この場合、電圧不平衡率は、ほぼ次式であらわされ、M座とT座に同一負荷電流が流れたときには電源に不平衡を生じない。

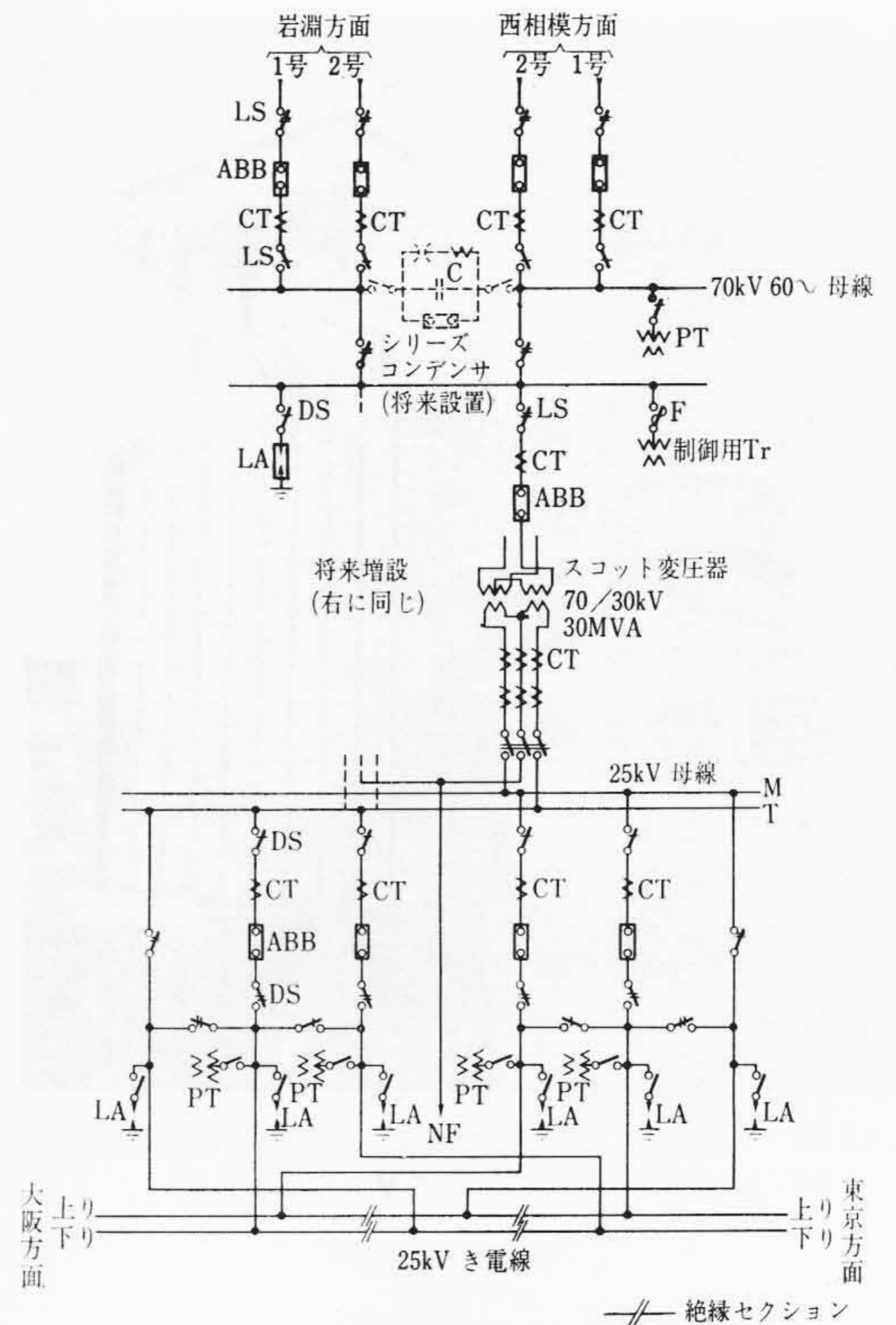
$$\text{電圧不平衡率 (\%)} = \frac{P_M - P_T}{P_S} \times 100$$

ここで P_S : 単相負荷における三相短絡容量 (kVA)

P_M, P_T : M座, T座変圧器の負荷 (kVA)

新幹線き電用スコット結線変圧器は、出力 30 MVA で、そのおもな仕様は次のとおりである。

- (1) 沼津, 岩淵, 熱海変電所用
 形式: 屋外用自冷式, 三相/二相3脚鉄心, 内鉄形, 制振遮へいダイヤフラム形コンサベータ付
 電圧: F 80.5-F 77-F 73.5-R 70/30 kV (無電圧タップ切換)
 周波数: 60 \sim 結線: 上/下
- (2) 清水変電所用
 (1)のほかに、負荷時タップ切換装置付
 電圧: F 79.8-R 72.8-F 65.8 kV (11 タップ)/30 kV



第10図 沼津変電所単線接続図

これらはいずれもM座、T座巻線を同一鉄心に巻き、一つのタンクに納めた構造で、小形軽量化と変電所設備の簡素化に役だっている。なお、鉄心には方向性ケイ素鋼帯を採用して磁気特性を向上させて小形化している。

電圧変動率の関係でインピーダンスを4%ときわめて小さくする必要から、低压巻線は二分割配列としている。M座の高圧巻線には、T座側の90度位相の異なる負荷電流が重畳して流れることによる交差インピーダンスを減少して負荷損を小さくするために、主巻線を交差接続している。また%インピーダンスが小さいので、短絡時発生する機械力の減少と各部の補強には十分な考慮がはらわれている。

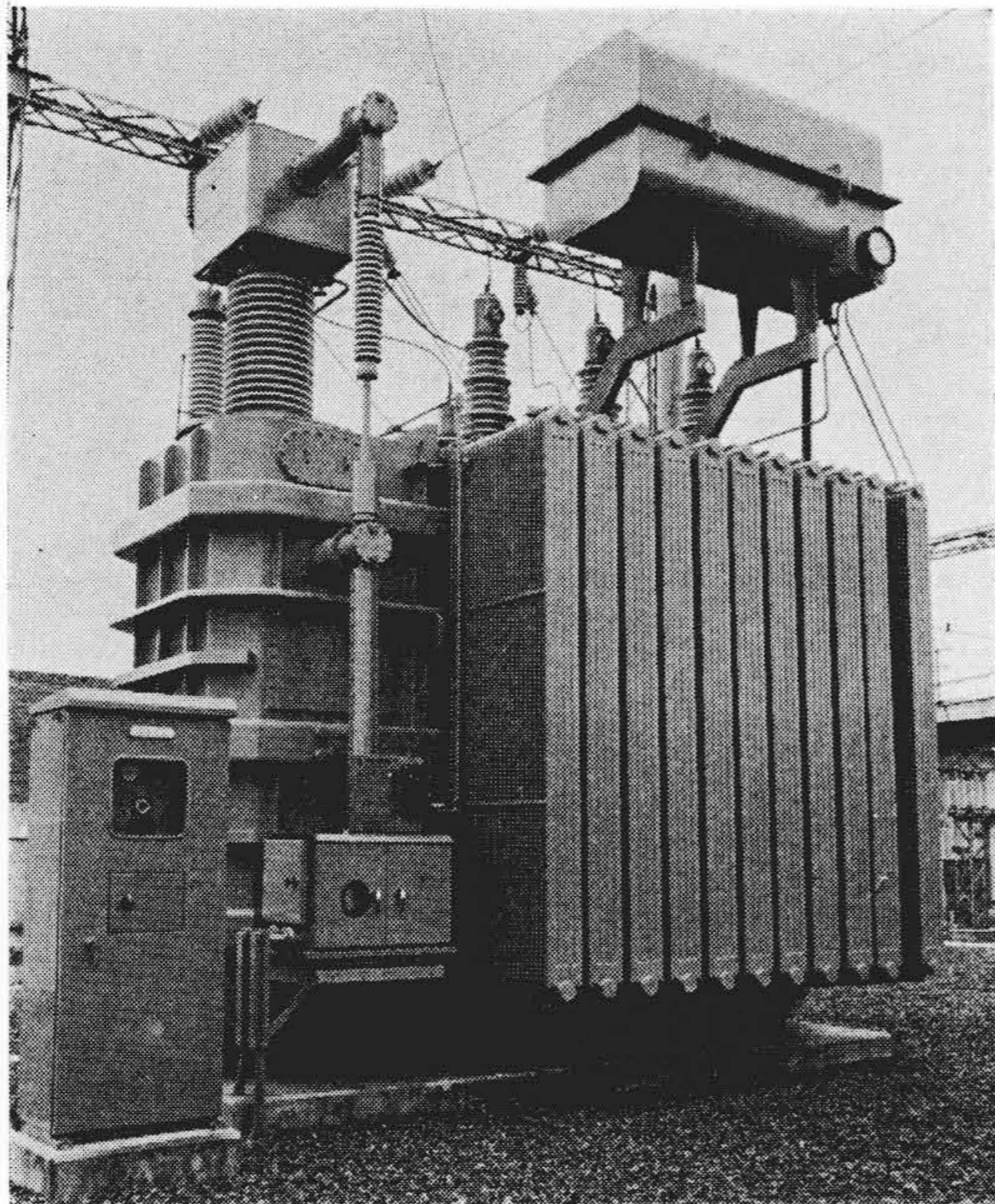
コンサベータはダイヤフラム形で、耐油性合成ゴムシートで直接油面をおおい、油と外気との接触を断ち、油の劣化を防止している。この構造では、油面の圧力は常に大気圧に保たれ、窒素ガスを使用しないので特殊の装置は不要で、構造は簡単となり、保守も容易である。

清水変電所用のものは、電圧調整範囲が約 \pm 10%と広いので、M座とT座の高圧巻線の接続部にタップ巻線を設けて、三相一括負荷時タップ方式としている。なお、この負荷時タップ切換装置は活線浄油装置付である。第11図は、清水変電所用スコット結線変圧器の外観を示す。

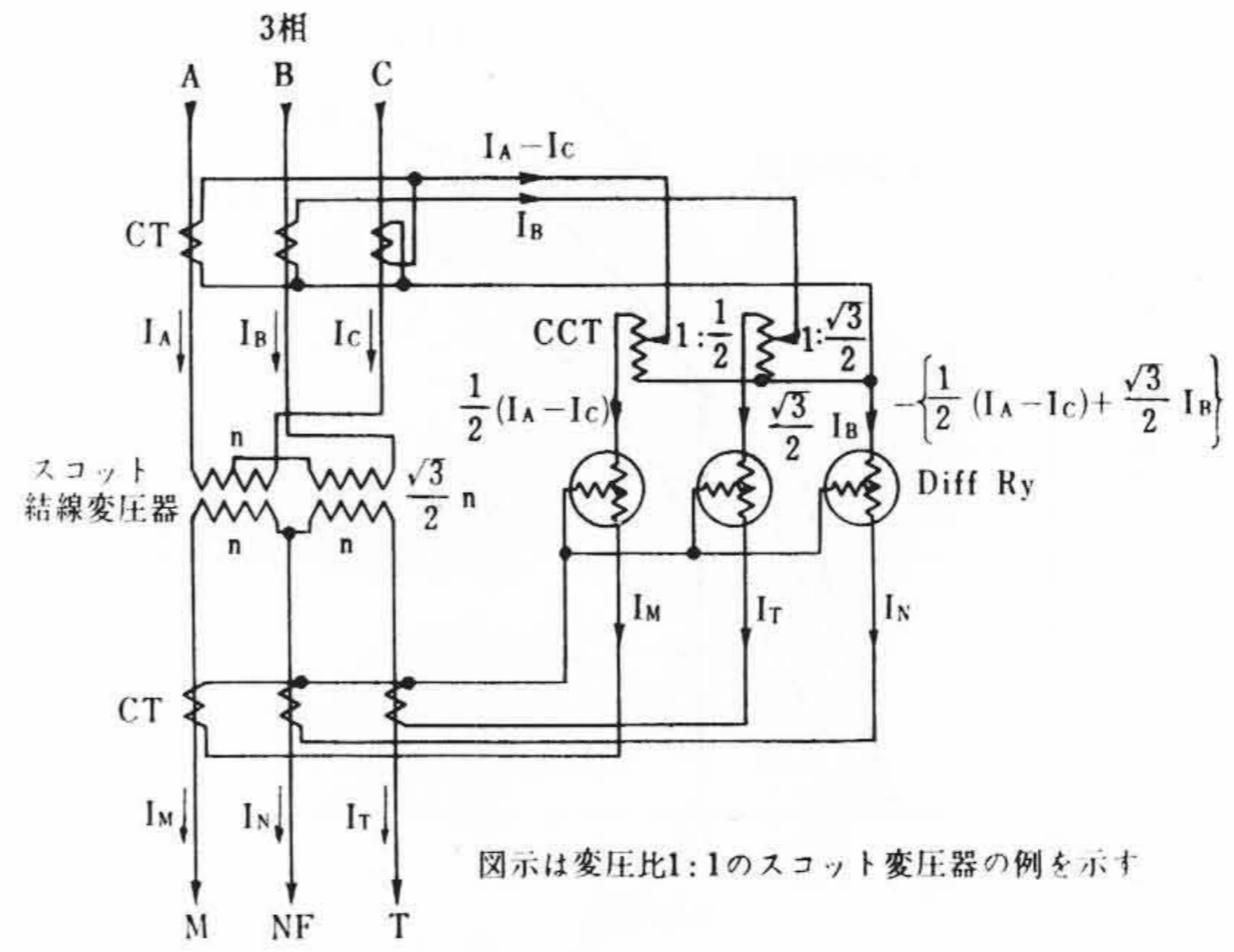
4.2 機器の制御, 保護

4.2.1 負荷時タップ切換変圧器の制御

新幹線のき電系統のうち、周波数変換機系統においては発電機の電圧制御を行なうので電源電圧変動は小さいが、一般電力系統の変電所は約 \pm 10%の電圧変動を見込む必要がある。このため、き電変電所のスコット結線変圧器には負荷時タップ切換装置を設けて変圧器の無負荷二次電圧を一定とするよう制御を行なっている。変圧器の無負荷二次電圧を制御することは、電源電圧の変動に対してのみ電圧制御することを意味しており、負荷電流による受電回路および変圧器のインピーダンス降下に対しては電圧制御を行わず、列車による変動負荷に対してタップ切換がひん繁に

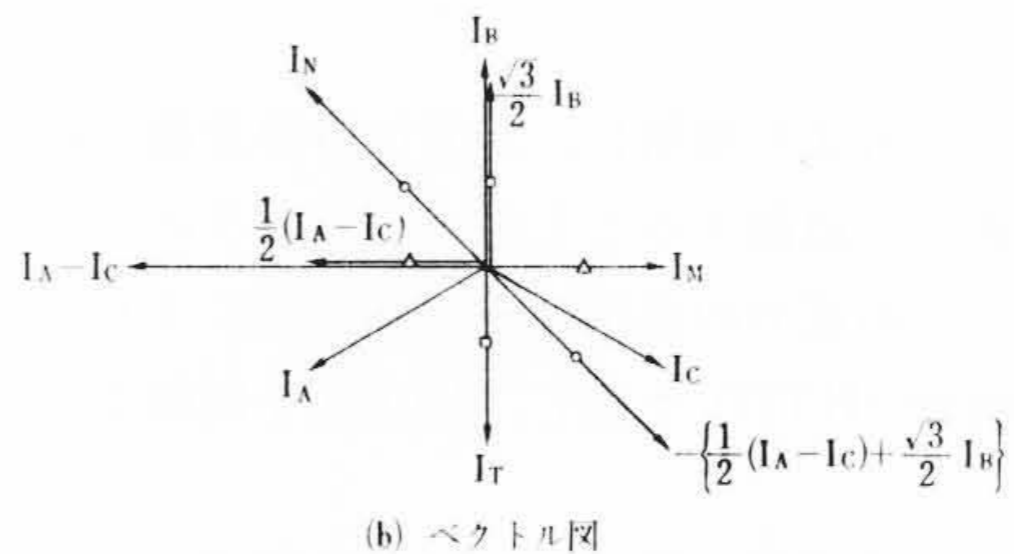


第11図 負荷時タップ切換装置付スコット結線変圧器 30 MVA 79.8~65.8 kV/30 kV



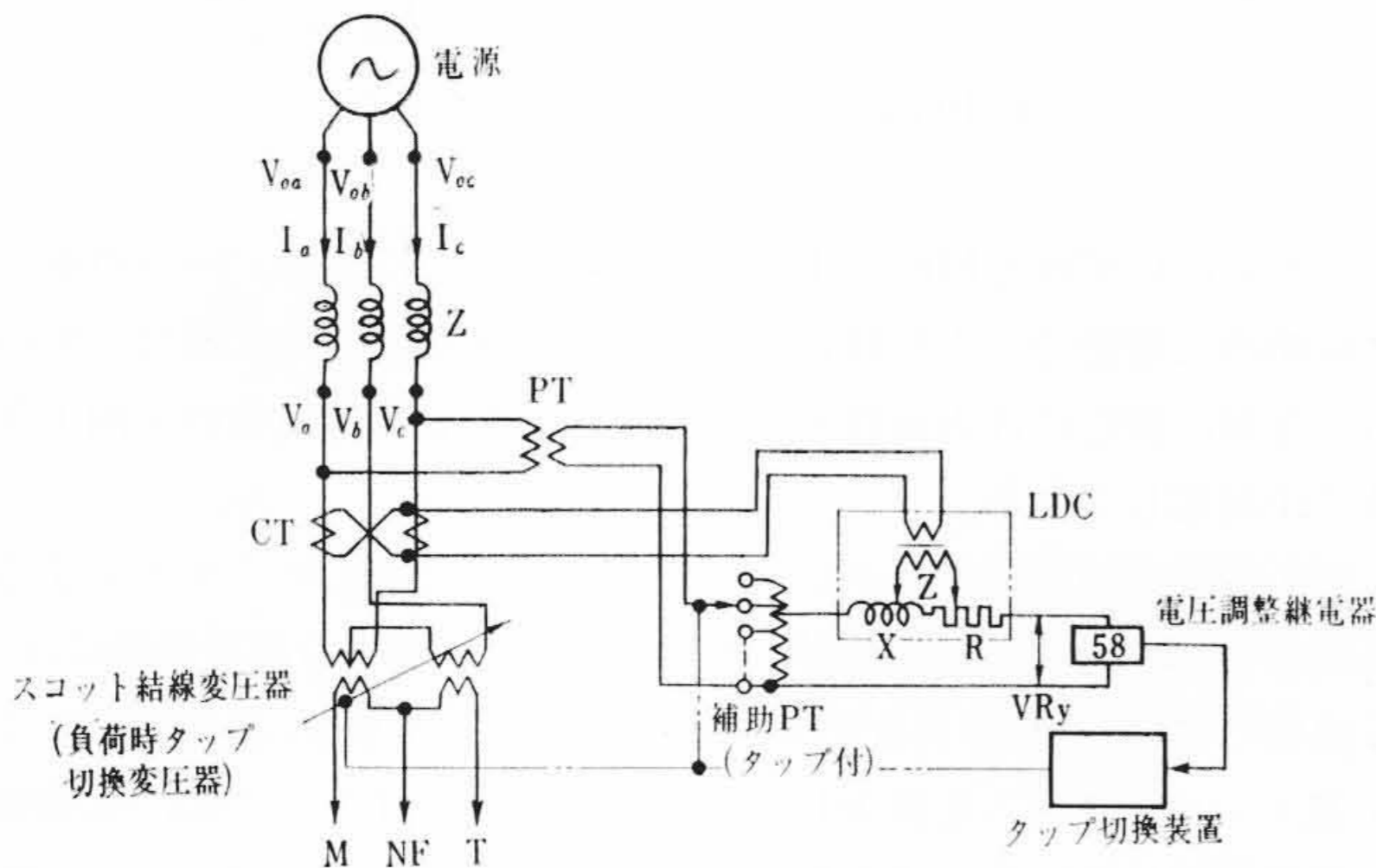
図示は変圧比1:1のスコット変圧器の例を示す

(a) 接続図

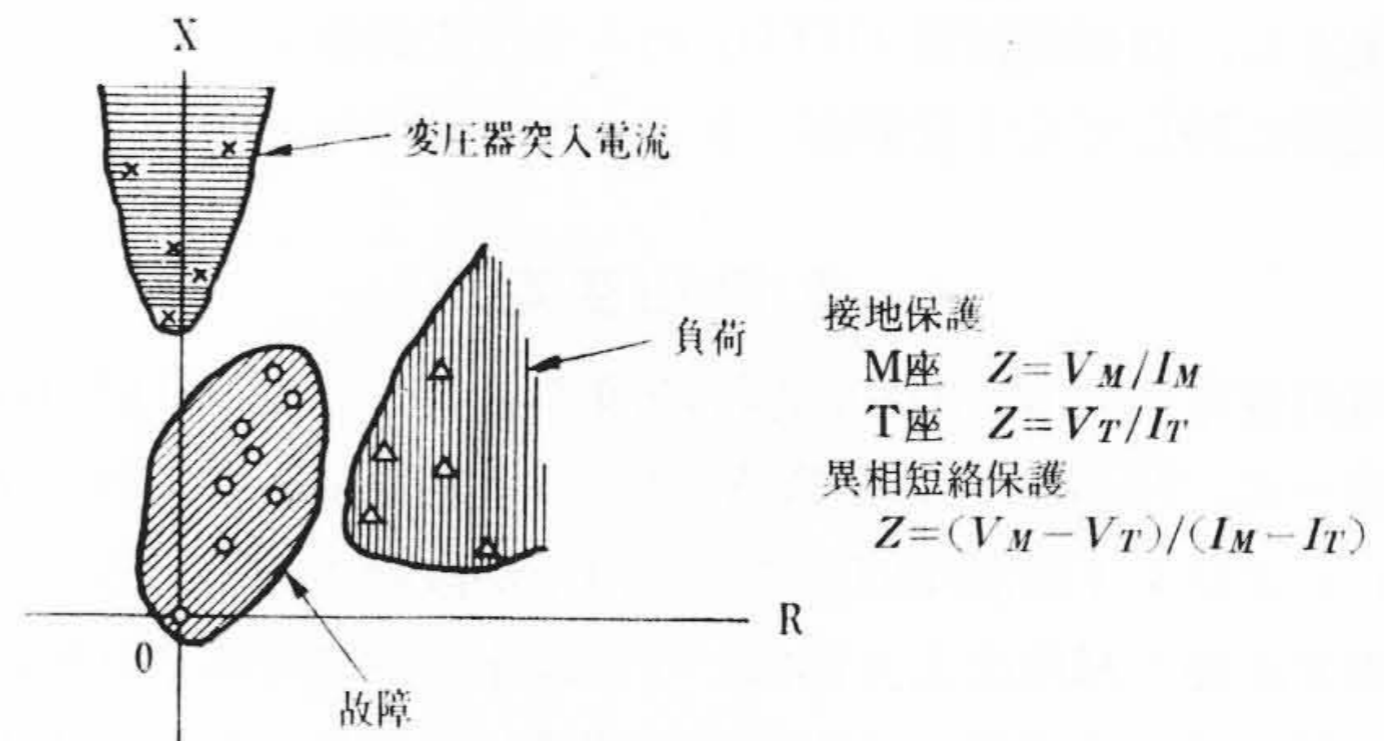


(b) ベクトル図

第13図 スコット結線変圧器保護方式



第12図 負荷時タップ切換スコット結線変圧器の制御



第14図 リレーのみるインピーダンス

なることを避けている。

タップ切換用電圧調整継電器には第12図に示すように、変圧器一次側にそう入されたPT二次から、タップ切換装置に連動し、変圧器タップと等価なタップを有する補助PTを介して電圧が供給されるため、電圧調整継電器に加わる電圧は、負荷電流による変圧器インピーダンス降下に関係なく、変圧器無負荷二次電圧に相当した値となる。また、電源から変圧器までの受電用送電線のインピーダンス降下は、同図に示すように線路電圧降下補償装置(LDC)によって補償されている。すなわち、LDCのインピーダンスを受電線路のインピーダンスと等価に整定しておく、変圧器一次側の各相の電圧は

$$\left. \begin{aligned} V_a &= V_{0a} - I_a Z \\ V_b &= V_{0b} - I_b Z \\ V_c &= V_{0c} - I_c Z \end{aligned} \right\}$$

したがって

$$\begin{aligned} V_{RY} &= (V_a - V_c) + (I_a - I_c)Z \\ &= (V_{0a} - I_a Z) - (V_{0c} - I_c Z) + (I_a - I_c)Z = V_{0a} - V_{0c} \end{aligned}$$

となり、負荷電流に不平衡があっても継電器電圧 V_{RY} は、電源電圧に相当した値となり、負荷の大きさ、不平衡度に関係なく、電源電圧変動のみを補償する電圧制御を行なわしめることができる。

4.2.2 変圧器の保護

スコット結線変圧器の保護には高速度比率差動継電器 $KYT_{13}^{(1)}$ を使用した。また、無負荷変圧器励磁の場合発生する突入電流によって、比率差動継電器が誤動作することを防止するため、突入電流誤動作防止装置 X-KYT を併用した⁽¹⁾。

スコット結線変圧器は、三相変圧器と異なり、一次側三相回路に対し、二次側は互いに90度、位相の異なる二相回路となるため、比率差動継電器の接続は、第13図(a)のような差動接続となるよう考慮してある。第13図(b)は比率差動継電器の電流ベクトル図で、スコット結線変圧器のM座およびT座に同一負荷が加わった状態におけるベクトル関係を示し、各比率差動継電器電流 $\frac{1}{2}(I_A - I_C)$ と I_M 、 $\frac{\sqrt{3}}{2}I_B$ と I_T 、 $-\left\{\frac{1}{2}(I_A - I_C) + \frac{\sqrt{3}}{2}I_B\right\}$ と I_N がそれぞれバランスしていることがわかる。

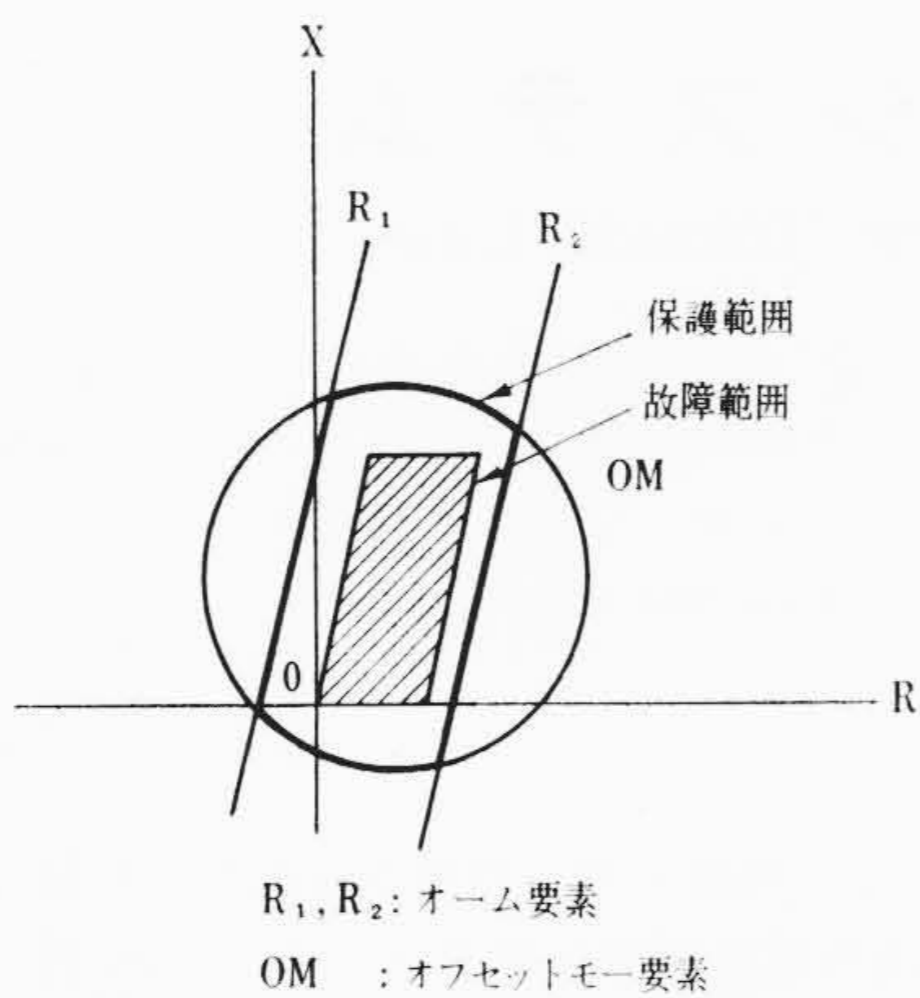
4.2.3 交流き電線の保護

新幹線のき電方式には前述のように、上下線別異相き電方式を採用している。このため、保護方式としては、従来の接地保護のほかには上下線の異相短絡保護の必要が生じた。

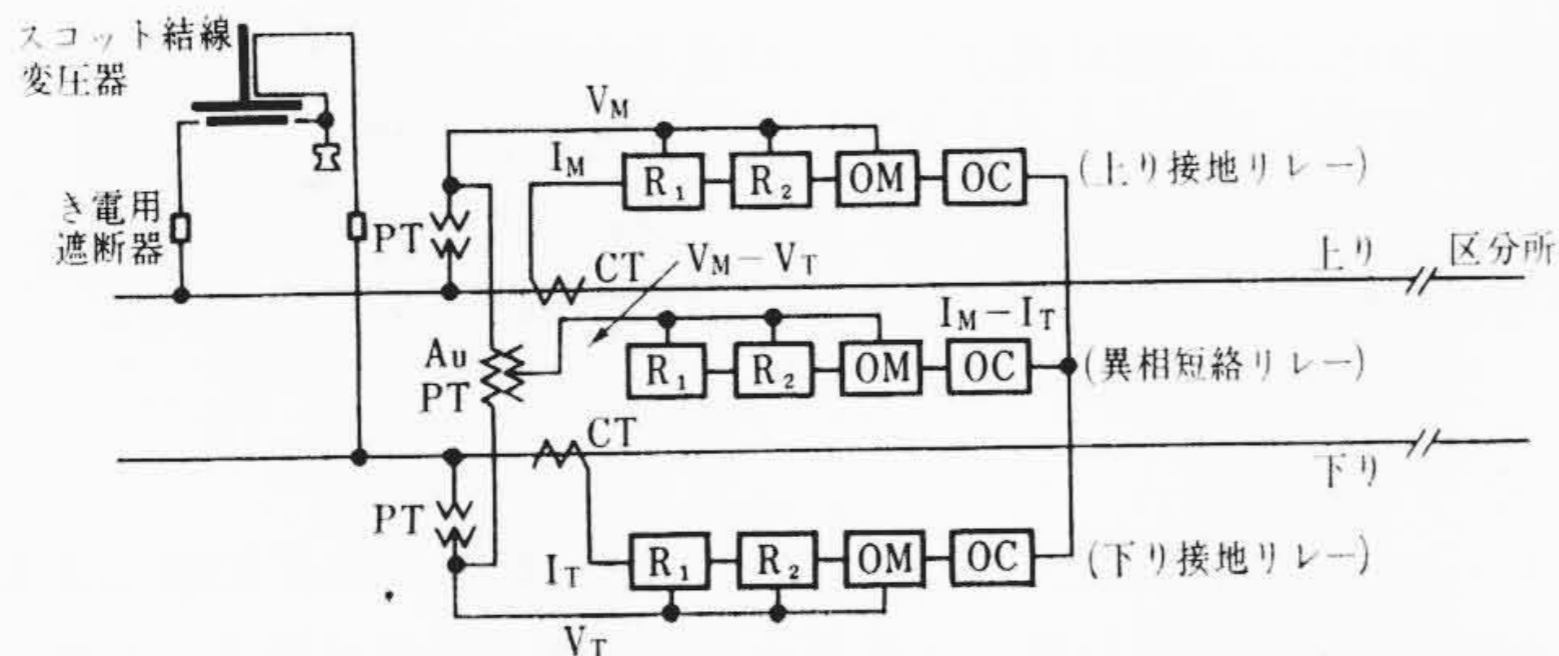
また列車が大容量負荷であるため、故障時と負荷の区別がつかない点、列車塔載の無負荷変圧器投入により大きな突入電流が流れる点などが問題となった。第14図はこれらの現象をインピーダンス図上で検討したもので、これより

(1) 接地保護は

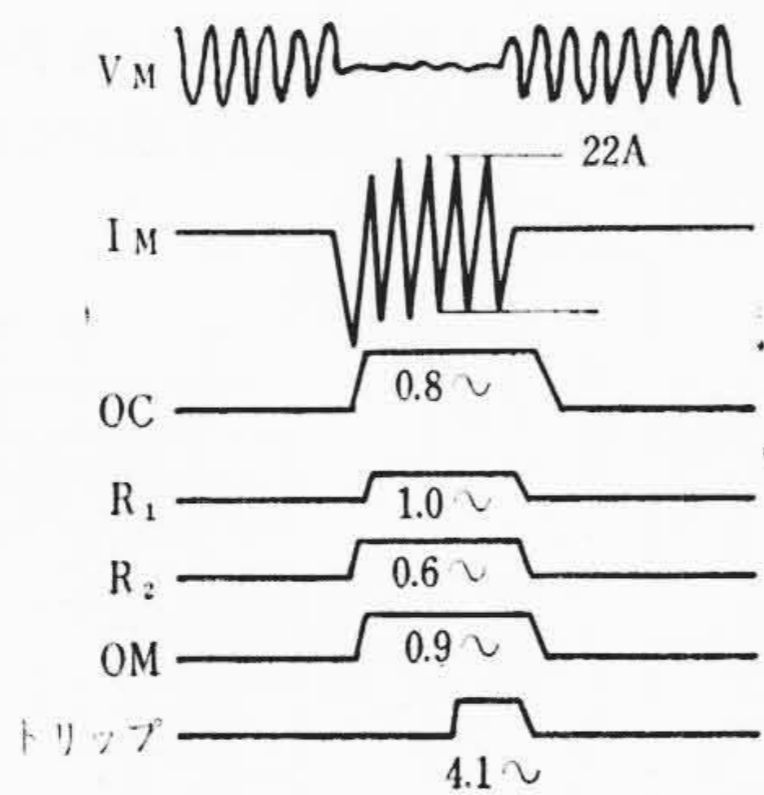
- M座 V_M/I_M により距離測定
- T座 V_T/I_T により距離測定



第15図 き電線保護リレーの整定



第16図 き電線保護リレー単線接続図



第17図 き電線保護リレー動作オシログラムの一例

(2) 異相短絡保護は

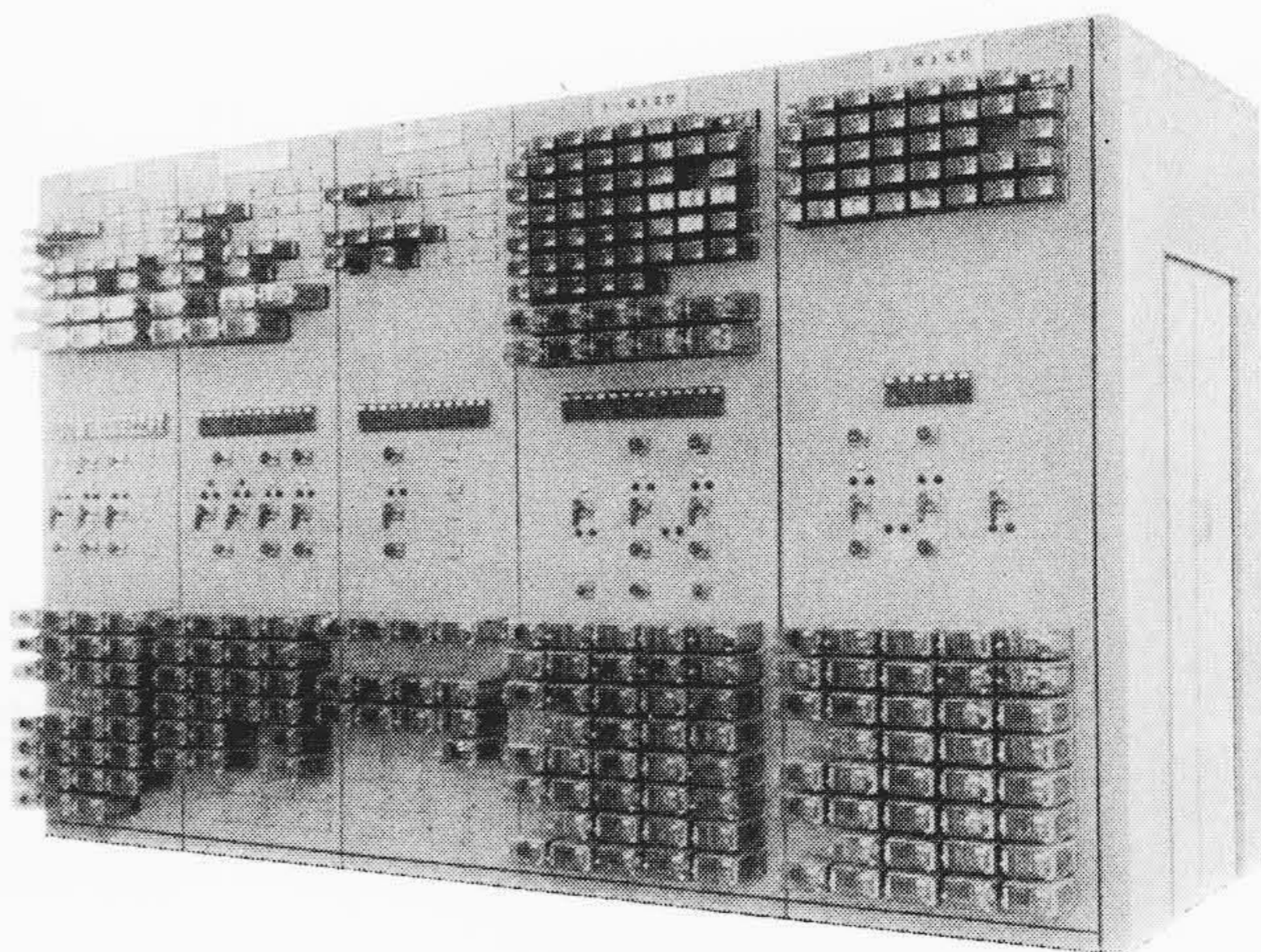
$$\frac{V_M - V_T}{I_M - I_T} \text{ により距離測定}$$

によるのが最適であることがわかった。

この結果、保護方式としては接地、異相短絡保護とも第15図に示すように、 R_1, R_2 なるオームリレーと、OMなるモーリレーによりかこんだ、ほぼ長方形の保護範囲とし、最小動作電流を規制するため、過電流リレーを併用している。第16図はこの方式の単線接続図を示し、第1表は各リレーの仕様を示す。この装置は大容量模擬送電線によって動作試験を行ない、好成績をおさめている。第17図は模擬送電線試験時の動作オシログラムの一例を示す。

第1表 き電線保護リレーの仕様

記号	リレー種類	形式	定 格
R ₁	オーム要素	UR-1E ₁	110V 5A 60 \sim 1 \sim 10 Ω , 最大感度位相角 75度
R ₂	オーム要素	UR-1E ₁	110V 5A 60 \sim 1 \sim 10 Ω , 最大感度位相角 75度
OM	オフセットモー要素	UHY-2E ₁	110V 5A 60 \sim 前方 3 \sim 30 Ω 後方 0 \sim 3 Ω , 最大感度位相角 75度
OC	過電流要素	UO-T ₂₁₋₂₁	5A 60 \sim 1.5 \sim 5A タップ



第18図 岩淵変電所納配電盤

き電回路に対しては上述の保護リレーを適用するとともに、接地リレー動作の場合は再閉路を行なって、き電電源の確保を図っている。たとえば、列車の変圧器一次回路故障のとき、き電用変電所の接地リレーが動作してき電用遮断器がトリップすると列車の電源開閉器は開路するので、故障は除去され、一定時間後自動再閉路してき電回路を回復することができる。

第18図はき電用配電盤を示す。保護リレーは背面に設置されている。また、き電用変電所は遠方制御装置による集中制御するのをたてまえとしているので、制御盤は写真に見えるように簡素化されている。

5. 結 言

以上、東海道新幹線の周波数変換設備およびき電用変電所の概要について述べたが、本幹線は高速度大容量列車の運転のため、周波数変換設備、スコット結線変圧器、保護方式などについて従来例のない多くの問題を含んでいる。これらについては種々の角度から検討して設計製作された。これらの設備が東海道新幹線の運転電力供給設備として十分その能力を発揮して、東海道の輸送能力の改善に貢献することを期待するとともに、今後予想される山陽幹線その他の計画の一助となれば幸いであると考えている。

参 考 文 献

- (1) 石田, 岡村, 清水, 渡井, 柴田: 日立評論 41, 645 (昭 34-5)