地下変電所用 275kV 400MVA 位相調整器

正員 竹本 和雄 正員 宮本 憲繁 (中部電力株式会社)

正員 中塚 昭治 正員 近藤 克三 (三菱電機株式会社)

275kV, 400MVA Phase Shifter for Underground Substation

Kazuo Takemoto, Member Norishige Miyamoto, Member (Chubu Electric Power Co., Inc)
Shoji Nakatsuka, Member Katsumi kondou, Member (Mitsubishi Electric Corp.)

Recently, the power demand has been increasing in Nagoya city. To supply the power stably, large and extra-high voltage substations should be installed at the central region of Nagoya city. But the harmonization of environment is required and the escalation of land price has become big problem. They are the reason why it was determined that the substation would be installed underground.

Usually the power system of substation has two independent routes connected to a power source for the supply reliability. But there is a phase difference between the routes because of a difference in power system construction and line length. In case of a loop system operation, a current caused by this phase difference influences the power system and may exceed the supply capacity of the line. A phase shifter was installed between the lines to control the current by adjusting the phases of both power sources.

The features of the phase shifter are; First, the phase shifting method that the output voltages always equals to the input ones without influence of phase angles is adopted. Secondly, the two-phase shell-form core and lay-down structure to fit a limited space in an underground substation is adopted. Finally, for underground substation, both passing and regulating capacities are the largest in Japan.

キーワード：変圧器，位相調整器，ループ，潮流制御，

1. まえがき

中部電力株式会社では，昭和63年に東ルートにより名古屋市内に初の超高压導入をしたのに続き，平成5年には南ルートを新設し，さらに松ヶ枝変電所新設に伴い，名古屋市内275kV系は2ルートとなり，供給力および信頼度は大幅に向上した。

松ヶ枝変電所は東ルートと南ルートの接続点に位置するが，南ルートの拠点には知多第二火力等(2800MW)の大電源が併入されているため，東ルートとの位相差は15°進みとなり，系統切替えの都度，火力の出力抑制による位相調整が必要で，系統運用上支障となる。

対策として，松ヶ枝変電所に位相調整器275kV, 400MVAを設置することとし，平成5年12月に運転開始した。

これは地下変電所に設置したもので，通過，調整容量とも最大級であり，かつ位相調整方式は調整角に影響されずに入出力電圧が等しい方式を採用した。この位相調整器は超高压の両系統間ならびに154kVおよび33kV系統のルー

プ時の位相調整を行ない，系統の併入，解列を容易にすることを目的として計画した。ここでは，本位相調整器の仕様上の特長および適用した技術について紹介する。

2. 電力系統と位相調整器の効果

〈2.1〉適用系統とその特性 図1に本位相調整器を適用した系統を示す。系統切替え時はループとするが，ループ系統内の潮流分布は，発電・負荷の配置ならびに各送電線の亘長や導体種類によるリアクタンスの大きさにより決まる。ルート拠点の知多第二火力から見て，南ルートは全線ケーブルのため，リアクタンス値は非常に小さい，東ルートは架空線を含むケーブル送電線路のため，リアクタンス値は大きい。この結果，潮流制御を行なわない場合は，最大15°の位相差が現れ，南ルート側にほとんどの潮流が乗り，送電設備容量を越える。系統運用はこの状態をさけるため，火力の出力調整をし，松ヶ枝変電所でのループ投入前の位相差を5°以下として，ループ潮流を送電設備容量以下とする操作が必要となる。

図 1 ループ系統
fig. 1. Loop system

この操作ができる時間帯は限られているため、系統運用上、特に支障となる。このため、両系統の中心に位置する松ヶ枝変電所に位相調整器を設置した。

操作方法は基幹給電制御所の自動化システムを活用して、潮流をもとに許容ループ潮流に抑制出来る最適タップ値を算出し、遠方制御で実施することとした。

〈2・2〉有効分潮流制御 系統ループ時は位相調整器により、以下に説明する原理で潮流制御が可能となる。

図1の系統を簡略して示すと図2となる。図2(a)で位相調整器によって受電端電圧 $\vec{E}_r$ と直角方向に $\vec{e}$ なる電圧が挿入される。ベクトルの関係は図2(b)のようになる。

ここで、 $\vec{e}$ は位相調整器による位相調整分電圧を表し、図では $\vec{E}_s$ との位相差を小さくする方向に加えられている。

$\vec{E}_s$: 電源電圧 $\vec{E}_r$: 受電端電圧 α : 位相調整角
 θ : 線路インピーダンスによる位相角変化分

図 2 275kV 系統の簡略化
fig. 2. Simplification chart of 275kV system

南ルートおよび東ルートの潮流 P_1 、 P_2 はそれぞれ次式で表される。

$$\begin{aligned} P_1 &= |\vec{E}_r| \cdot |\vec{I}_1| \\ &= |\vec{E}_r| \cdot (|\vec{E}_s - \vec{E}_m|) / X_1 \\ &= |\vec{E}_m + \vec{e}| \cdot (|\vec{E}_s - \vec{E}_m|) / X_1 \\ &= |\vec{E}_r + \vec{e}| \cdot |\vec{E}_s| \sin(\theta - \alpha) / X_1 \quad \dots (1) \\ P_2 &= |\vec{E}_r| \cdot |\vec{I}_2| \\ &= |\vec{E}_r| \cdot (|\vec{E}_s - \vec{E}_r|) / X_2 \\ &= |\vec{E}_s| \cdot |\vec{E}_r| \sin \theta / X_2 \quad \dots (2) \end{aligned}$$

ただし、 $\vec{E}_r \approx \vec{E}_m$

位相角 $(\theta - \alpha)$ が小さい時は、 $|\vec{E}_s| \approx |\vec{E}_r + \vec{e}|$ となる。したがって、南ルートの潮流は $\vec{E}_s$ と $\vec{E}_r$ との位相差 $(\theta - \alpha)$ によって変化し、位相差が小さくなると潮流が抑制される。

松ヶ枝変電所の位相調整器は、 $\vec{E}_s$ と $\vec{E}_r$ との位相差を小さくし、南ルートの潮流を抑制するように制御することによって、東ルートへも適正な潮流を送電できるようにした。

〈2・3〉位相調整器と周辺機器の概要 位相調整器は図3に示すように、系統的には甲～乙セクションにまたがって接続され、南ルートと東ルートに直列に入れる設計とした。位相調整器の調整幅は甲基準として乙側に最大 15° 遅らせる片側調整とした。このとき、位相調整器の調整幅を $1/2$ とし、甲母線側は $15^\circ/2$ 進み、乙母線側は $15^\circ/2$ 遅れ(甲～乙間では 15° の位相差)とすることにより、自己容量の低減を図った。1タップあたりの位相調整幅は 0.9° であり、これは主にタップ切換装置(LTC)の性能により決定した。位相調整器周辺には、位相調整器一次(甲セクション側)と二次(乙セクション側)および位相調整器をバイパスする形で遮断器(母線連絡)を設け、常時は、位相調整器を系統から切り離すと共に母線連絡遮断器を開放し、甲、乙分離で運用している。

図 3 システムの回路構成
fig. 3. Circuit composition of system

この位相調整器と遮断器との接続には、ガス絶縁母線(GIB)を採用した。

位相調整器を使用している状態で、系統異常等により定格容量400MVAを大幅に越える潮流が流れたときは、系統分離を避けるため、

- ①母線連絡遮断器を自動的にバイパス「投入」し、
- ②位相調整器の一次および二次遮断器を「開放」、するシーケンスを組み、位相調整器の過負荷防止を図っている。

3. 原理

〈3.1〉 基本原理 位相調整器とは、2つの系統間に設置して、線路電圧に対して直角あるいは120度の位相差のある調整電圧を挿入し、両系統の線路電圧の位相を調整するものである。本位相調整器の定格を表1に示す。

表1 位相調整器の定格

Table 1. Rating of phase shifter

形 式	特別三相 60 Hz 外鉄形 送油水冷式 負荷時タップ切換器付
容量・電圧	400 MVA, 275 kV
調整角度	0 ~ 15度 (タップ点数17点)
絶縁階級	線路 200号, 中性点 80号
インピーダンス (400MVA基準)	11.2% at 15度 8.6% at 0度

〈3.2〉 結線 位相調整器の結線方式は種々考えられるが、実用的な3種類の方式について表2にその結線および比較を示す。いずれの方式を採用するかは運用形態を考慮して決める必要があるが、調整角によらず無負荷時入出力電圧が等しいことと、超高圧系統に接続されることからタップ巻線を線路端に置かないで製作できる方式1を採用することとした。

本方式の位相調整器は、“調整変圧器”と“直列変圧器”と呼ばれる一対の変圧器で構成される。

調整変圧器側にある星形結線のタップ巻線と直列変圧器側にある三角形結線の励磁巻線を接続することにより星形-三角形変換を行い、共通巻線の電圧 E_c に対して、90度位相の異なる電圧 E_s を直列巻線に発生させる。

この直列巻線の両端を系統1-2間に挿入し、タップ巻線電圧を調整することにより直列巻線電圧の大きさを増減すれば、系統電圧 E_1 , E_2 間の位相差 θ を調整することができる。本方式の電圧・電流分布を表3に示す。

表2 結線

Table 2. Connection of windings

調整方式	方式 1		方式 2		方式 3
結線	調整変圧器	直列変圧器	調整変圧器	直列変圧器
通過容量	400MVA		400MVA		400MVA
調整容量	104MVA		107MVA		146MVA
調整範囲	$\theta = 0^{\circ} \sim +15^{\circ}$		$\theta = 0^{\circ} \sim +15^{\circ}$		$\theta = 0^{\circ} \sim +15^{\circ}$
特長	・調整角によらず、無負荷時入出力電圧が等しい。		・調整角により、無負荷時入出力電圧が変化する。 ($\theta = 15^{\circ}$ の時 $E_2/E_1 = 1.035$)		・タップ巻線を線路端に配置する必要がある。 ・調整角により無負荷時入出力電圧が変化する。 ($\theta = 15^{\circ}$ の時 $E_2/E_1 = 1.225$)

表3 位相調整器の電圧・電流
Table 3. Voltage and current of phase shifter

	調整変圧器	直列変圧器		
記号	θ : 位相調整角度 P_n : 通過潮流 ($P_n=400$ MVA) V_n : 系統線間電圧 E_n : 対地電圧 ($E_n=V_n/\sqrt{3}$) I_n : 線路電流 ($I_n=P_n/\sqrt{3} \cdot V_n$) α : 調整変圧器の巻数比 β : 直列変圧器の巻数比			
結線				
調整角	<div><div><p>0° の時</p><p>$\dot{E}_1 = \dot{E}_2 = E_n$</p></div><div><p>θ° の時</p><p>$\dot{E}_1 = \dot{E}_2 \approx E_n$</p></div><div><p>15° の時</p><p>$\dot{E}_1 = \dot{E}_2 \approx E_n$</p></div></div>			
電圧 (kV)	$\theta = 0^\circ$ $E_n = \frac{275}{\sqrt{3}}$	$\theta = 15^\circ$ $E_n \times \cos \frac{\theta}{2} = \frac{275}{\sqrt{3}}$	$\theta = 0^\circ$ 0	$\theta = 15^\circ$ $2 \times E_n \times \sin \frac{\theta}{2} = 41.4$
電流 (A)	0 (励磁電流のみ)	$2 \times I_n \times \sin \frac{\theta}{2} = 219$	$I_n = \frac{P_n}{3 \times E_n} = 840$ ($P_n=400$)	$I_n = 840$
自己容量 (MVA)	$E_n \times 2 \times I_n \times \sin \frac{\theta}{2} \times 3 \text{相} = 2 \times P_n \times \sin \frac{\theta}{2} = 104$		$2 \times E_n \times \sin \frac{\theta}{2} \times I_n \times 3 \text{相} = 2 \times P_n \times \sin \frac{\theta}{2} = 104$	
巻数比	$E_n \times \cos \frac{\theta}{2} \times \alpha \times \sqrt{3} \times \frac{1}{\beta} = 2 \times E_n \times \sin \frac{\theta}{2}$ の関係から $\beta = \frac{\sqrt{3}}{2} \times \alpha \times \cot \frac{\theta}{2} = 6.58 \alpha$			

4. 構造

本位相調整器は地下変電所に据付けられることから、搬入口寸法(L5.4m×W5.4m)、および重量制限が厳しい。このため、特別三相方式を採用した。

さらに、据付高さ寸法を1階分の高さ(6m)以内とするために次のようなコンパクト化対策を図った。

〈4.1〉複合一体化 調整変圧器と直列変圧器はどちらも外鉄形変圧器構造であり、各々同一幅の鉄心を水平に積層した単純構造である。このため、お互いの鉄心を共用してコンパクト化することが容易に可能である。このときの各変圧器の各相は鉄心内磁束量の差が、共用鉄心部で最小となるように配置すればよい。つまり、U (V, W) 相の直列変圧器とV (W, U) 相の調整変圧器を図4の様に配置すれば、鉄心内磁束ベクトルは図5に示すとおりとなり、共用鉄心部の磁束は調整角度を0°としたときに最大となる。

図4 調整変圧器と直列変圧器の共用鉄心構造
Fig. 4. Common core structure of regulating transformer and series transformer

図5 位相調整器の磁束ベクトル
Fig. 5. Magnetic-flux vector of phase shifter

調整角度を0°としたときの共用鉄心部の磁束量は、単独構成時における調整変圧器の鉄心内磁束量と同じである。つまり、共用鉄心部の鉄心幅は調整変圧器の鉄心幅と同じでよいこととなる。さらに言い換えるならば、直列変圧器の鉄心の一辺が不要となることを示している。

〈4.2〉横置構造 前述のとおり調整変圧器と直列変圧器は複合一体化され、さらに図6に示すような”フォームフィット構造”となっている。これは外鉄形変圧器の標準構造であり、中身とタンクが一体となっているため図7に示すような、通常の製品高さ方向を約90°寝かせた横置構造の採用が可能である。横置構造は従来から移動用変圧器等に採用されており、据付場所の高さ低減に大きな効果がある。

図6 外鉄形変圧器のフォームフィット構造
Fig. 6. Form-fit structure of shell-form transformer

図7 外鉄形変圧器の横置構造
Fig. 7. Lay-down structure of shell-form transformer

〈4.3〉輸送寸法 上記構造を採用することにより、本体構造寸法(L5.0m×W2.8m×H3.4m)を達成した。

5. 効果

上記のとおり、外鉄形変圧器構造の特長を活用することにより、地下変電所の1階高分のフロアへ設置することが可能となると共に、図8の効果を得られた。

図8 共用鉄心および横置構造による効果
Fig. 8. Effect of lay-down structure with common core

図9 にこの位相調整器の外形図を、図10に完成写真を示す。

(W11m x D8.3m x H5m)
図9 275kV 400MVA 位相調整器 外形
Fig. 9. Schematic diagram of 275kV 400MVA Phase shifter

6. むすび

本論文の特長を要約すると、次のようである。

- (1) 本位相調整器の導入により、名古屋市内の2つの超高压系統（東，西ルート）を接続してループ化を図ることが可能となり、系統の信頼度を上げることができた。
- (2) 外鉄形変圧器構造の特長を活かした二相鉄心・横置構造の採用により、所要据付スペースの削減、即ち機器の大幅なコンパクト化を実現した。

（平成6年8月5日受付、同年11月4日再受付）
文 献

(1) 竹本和雄・宮本憲繁・工藤 淳・中塚昭二・近藤克三：「中部電力（株）松ヶ枝変電所納め 超高压地下変電所用変圧器設備」，三菱電機技報，68，No7，72-77（1994）

図10 275kV 400MVA 位相調整器 据付状態
Fig.10. Installed 275kV 400MVA phase shifter

竹本 和雄 （正員）1939年4月19日生まれ。58年3月豊川工業高校電気科卒業。同年中部電力（株）入社。主として変電所建設・設計に従事。現在、中央送変電建設所設計技術グループ担当課長

宮本 憲繁 （正員）1948年10月6日生まれ。67年3月岡崎工業高校電気科卒業。同年中部電力（株）入社。主として変電建設・設計に従事。現在、中央送変電建設所設計技術グループ担当課長

中塚 昭治 （正員）1950年1月5日生まれ。72年3月岡山大学工学部電子工学科卒業。同年三菱電機（株）入社。主として電力用変圧器の設計に従事。現在、赤穂製作所技術第一部設計第一課長

近藤 克三 （正員）1957年3月1日生まれ。80年3月成蹊大学工学部電気工学科卒業。82年3月同大学大学院工学研究科修士課程修了。同年三菱電機（株）入社。主として電力用変圧器の設計に従事。現在、赤穂製作所技術第一部設計第一課主事